



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Dottorato di Ricerca in Energia

Indirizzo: Tecnica ed Economia dei Trasporti

Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici

S.S.D. ICAR/05

TECNICHE QUANTITATIVE PER LA PROGETTAZIONE DELLA TARIFFAZIONE DELLA SOSTA IN AMBITO URBANO

IL DOTTORE
ING. MANLIO DI GIOVANNA

IL COORDINATORE
PROF. ALDO ORIOLI

IL TUTOR
PROF. MARCO MIGLIORE

CICLO XXVI
2016

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1	
ROAD PRICING E PARKING PRICING COME STRUMENTI DI CONTROLLO DELLA DOMANDA.....	5
1.1 Premessa.....	5
1.2 Equilibrio tra domanda e offerta di trasporto.....	6
1.3 La congestione e le tecniche di controllo della domanda	7
1.3.1 Politiche di regolazione.....	7
1.3.2 Incentivazione di sistemi di mobilità alternativi.....	8
1.3.3 Politiche a favore del trasporto pubblico	9
1.3.4 Politiche di tariffazione	9
1.4 Analisi di esperienze internazionali	11
1.4.1 L'esperienza di Singapore	11
1.4.2 L'esperienza di Bergen	14
1.4.3 L'esperienza di Oslo.....	15
1.4.4 L'esperienza di Trondheim.....	17
1.4.5 L'esperienza di Londra	19
1.4.6 L'esperienza di San Francisco.....	21
1.5 Studio bibliografico e metodologico.....	22
1.5.1 <i>La percezione della congestione della rete tramite l'utilizzo delle tariffe di parcheggio.....</i>	<i>23</i>
1.5.2 <i>Modelli di ottimizzazione per il problema del parking pricing urbano</i>	<i>25</i>
1.5.3 Metodologia proposta.....	28
1.5.4 Tecnologia implementabile	30

CAPITOLO 2

LA MODELLAZIONE DEL SISTEMA DI TRASPORTO	35
2.1 Premessa.....	35
2.2 Individuazione dell'area di studio.....	36
2.3 Zonizzazione	37
2.4 Definizione del modello di offerta del sistema di trasporto.....	38
2.4.1 Le funzioni di costo.....	44
2.4.2 La modellazione della sosta	48
2.5 La domanda di mobilità.....	50
2.5.1 Metodologia di stima della domanda di trasporto.....	51
2.5.2 L'approccio dei modelli descrittivi.....	57
2.5.3 L'approccio dei modelli comportamentali.....	58
2.6 L'interazione domanda/offerta.....	62
2.7 Algoritmi risolutivi del problema dell'assegnazione.....	65
2.7.1 Assegnazione <i>ToN (Tutto o Niente)</i>	66
2.7.2 Assegnazione <i>DUE (Deterministic User Equilibrium)</i>	66
2.7.3 Assegnazione <i>SNL (Stochastic Network Loading)</i>	68
2.7.4 Assegnazione <i>SUE (Stochastic User Equilibrium)</i>	68
2.7.5 <i>L'ipercammino di minimo costo</i>	70
2.8 Metodi e modelli per la progettazione dell'offerta.....	81
2.8.1 Formulazioni matematiche generali del problema di progettazione	84
2.8.2 Esempio di modello di progettazione dei prezzi	86
2.9 Conclusioni	89

CAPITOLO 3

APPLICAZIONE SUL CASO STUDIO DI PALERMO.....	91
3.1 Premessa.....	91
3.2 Area di studio e zonizzazione nel contesto urbano della città di Palermo.....	92

3.3	Definizione dell'offerta di trasporto	95
3.3.1	Il grafo stradale.....	95
3.3.2	L'offerta di sosta.....	97
3.3.3	Il TPL (<i>trasporto pubblico locale</i>).....	101
3.3.4	Le alternative <i>car pooling</i> e <i>car sharing</i>	104
3.4	La domanda di spostamento.....	107
3.4.1	La matrice <i>OD</i>	108
3.4.2	Il modello di scelta modale	109
3.5	L'interazione domanda offerta per l'applicazione.....	114
3.5.1	Il software di assegnazione AxE	114
3.5.2	Gli scenari progettuali	118
3.6	La funzione obiettivo	123
3.7	L'euristica	126
3.8	I risultati dell'iter progettuale.....	129
3.8.1	Equilibrio <i>Algoritmico-Euristico</i>	129
3.8.2	Incentivazione delle modalità alternative.....	135
3.8.3	Ottimo di progettazione.....	137
3.9	Considerazioni finali	142
 CONCLUSIONI.....		145
 RINGRAZIAMENTI		147
 BIBLIOGRAFIA		149

INTRODUZIONE

Sempre più spesso si assiste oggi a scenari di vita urbana in cui il traffico veicolare privato non lascia spazio al cittadino, alla pedonalità e, più in generale, ad una mobilità sostenibile. Ne conseguono scarse condizioni di vivibilità per la popolazione, diffusione di fenomeni di degrado, disaffezione ad importanti aree urbane e più in generale un senso di disfatta per la perdita della “proprietà” di aree urbane di alto valore sociale e culturale da parte di una popolazione schiava di questo frenetico progresso che ha dimenticato l'importanza della sostenibilità dei sistemi di trasporto.

È pertanto importante dare risposte alternative, tecnologicamente innovative ed economicamente sostenibili a un problema così complesso come quello della mobilità. Non bastano interventi esclusivamente tecnici a risanare la frattura che si è creata tra il cittadino e la città, ma bisogna andare più in profondità partendo dagli aspetti culturali e comportamentali. Occorre intervenire sulle abitudini di mobilità degli utenti, scoraggiandoli nell'uso del mezzo privato ma al contempo agendo sull'offerta di trasporto pubblico, rendendolo sempre più performante in termini di servizio e d'impatto ambientale.

In quest'ottica l'utilizzo di tecniche di tariffazione dell'infrastruttura viaria è un ottimo strumento per orientare la domanda di mobilità verso le modalità di trasporto sostenibili. L'instaurazione di politiche di *pricing* può disciplinare il sistema di trasporti eliminando la congestione, ma non deve costituire una mera tassazione dell'utente che, a fronte di una spesa, non percepisce un reale vantaggio sulle proprie condizioni. Ad oggi infatti numerose resistenze dibattono sull'adozione di schemi di *pricing* nei centri urbani dalla presunta iniquità, che renderebbero di fatto accessibili i centri urbani soltanto a coloro che possono permettersi di pagare la tariffa di

accesso. Ma al contempo l'evoluzione di tecnologie innovative di rilevamento e di infomobilità consentono di ipotizzare un completo ribaltamento dei criteri di tassazione del traffico stradale, dove il carico fiscale potrebbe essere rimodulato in relazione agli effettivi comportamenti di ogni singolo utente.

L'obiettivo è stato quello di controllare e limitare la mobilità all'interno di una determinata area urbana attraverso un nuovo modo di concepire le ZTL (Zone a Traffico Limitato). Si è pensato quindi ad un sistema che ha le caratteristiche di uno schema di *parking pricing*, ma con potenzialità tali da influire anche sulla mobilità all'interno dell'area interessata perseguendo gli stessi obiettivi e ottenendo gli stessi risultati di una classica ZTL. Si è inoltre indagato su come un qualsivoglia schema di tariffazione può integrarsi con altre misure, quali, ad esempio: la limitazione dell'accesso autoveicolare a determinate aree (zone a traffico limitato, aree pedonali), la previsione di misure e la realizzazione di interventi sulla rete stradale funzionali ad una riduzione della velocità di percorrenza da parte degli autoveicoli (*traffic calming*), la promozione della mobilità ciclopedonale (piste ciclabili, attraversamenti pedonali protetti, ecc.), il potenziamento delle reti di trasporto pubblico e la realizzazione di interventi finalizzati a garantire la regolarità al servizio (corsie riservate e/o protette, priorità semaforica, ecc.), la promozione dell'uso associato di autovetture private negli spostamenti sistematici (*car pooling*) e dello sviluppo di flotte di autovetture collettive (*car sharing*).

La tematica in oggetto è stata approfondita effettuando prima una disamina dello stato dell'arte dei metodi e modelli utilizzati per il calcolo delle tariffe per diversi schemi di *pricing*. Quindi si è analizzata la metodologia da seguire per la determinazione e l'ottimizzazione della tariffa di parcheggio, come soluzione sostitutiva alle politiche attuali di *pricing* all'interno delle aree a traffico limitato. Trattasi di modello matematico integrato da regole di buona progettazione. Infine si è applicata la

metodologia alla città di Palermo, per evidenziare potenzialità e limiti del modello.

Il metodo studiato individuerà una strategia d'azione capace di spostare un'interessante aliquota di utenti verso una mobilità sostenibile, capace di autofinanziarsi e rispettosa di tutte le componenti di traffico, pedonale inclusa.

CAPITOLO 1

ROAD PRICING E PARKING PRICING COME STRUMENTI DI CONTROLLO DELLA DOMANDA

1.1 Premessa

L'andamento di crescita della domanda di trasporto, registrato negli ultimi anni soprattutto in ambito urbano, è fortemente correlato a diversi fattori di carattere economico, demografico e sociale. Inoltre costi, tempi, nonché vincoli ambientali ed urbanistici, non consentono di poter migliorare l'offerta di trasporto agendo su infrastrutture e servizi.

Le reti stradali urbane sono oggi caratterizzate da elevati livelli di congestione, con costi sociali e ambientali diretti e indiretti, a carico sia dei singoli utenti sia della collettività, tali da far considerare il traffico come uno dei più importanti e urgenti problemi da risolvere in ambito urbano.

A fronte di queste problematiche, lo studio in oggetto vuole affrontare il tema del *road pricing* e del *parking pricing* e di come questi strumenti di regolazione del traffico si possono integrare all'interno del sistema trasportistico già esistente.

L'adozione di uno schema di *pricing* può rappresentare una parte rilevante di una più generale strategia di gestione del traffico e/o di miglioramento dello stato dell'ambiente nelle aree urbane. Un qualsivoglia schema di tariffazione può integrarsi con altre misure, quali, ad esempio: la limitazione dell'accesso veicolare a determinate aree (zone a traffico limitato, aree pedonali), la previsione di misure e la realizzazione di interventi sulla rete stradale funzionali a una riduzione della velocità di percorrenza da parte dei veicoli (*traffic calming*), la promozione della mobilità ciclopedonale (piste ciclabili, attraversamenti pedonali protetti, ecc.), il potenziamento delle reti

di trasporto pubblico e la realizzazione di interventi finalizzati a garantire la regolarità del servizio (corsie riservate, priorità semaforica, ecc.), la promozione dell'uso associato di autovetture private negli spostamenti sistematici (*car pooling*) e lo sviluppo di flotte di autovetture collettive (*car sharing*). Si può, inoltre, prevedere la modulazione delle tariffe di *road pricing* per promuovere l'uso di veicoli a elevata efficienza e ridotto impatto ambientale e/o la penalizzazione di veicoli inquinanti o caratterizzati da elevati consumi.

1.2 Equilibrio tra domanda e offerta di trasporto

L'obiettivo è quello di controllare e limitare la mobilità all'interno di una determinata area urbana attraverso un nuovo modo di concepire le ZTL (Zone a Traffico Limitato).

La regolazione della domanda e dell'offerta è uno strumento della politica del trasporto utile a stimolare il mercato a raggiungere una posizione di ottimo collettivo. La regolazione della domanda nasce dalla necessità di ridurre il livello di produzione e di consumo di un servizio. Qualora si voglia ridurre la domanda di traffico gli strumenti sono:

- strumenti economici: prezzi, tariffe, tasse;
- strumenti amministrativi: divieti, limitazioni;
- strumenti concertativi: piani, accordi.

Con strumenti economici è possibile realizzare un'azione economicamente efficiente, aumentando in modo visibile e diretto il costo della mobilità per far sì che rinuncino allo spostamento i soggetti il cui viaggio ha via via un minor valore economico. Con strumenti amministrativi il razionamento sarà indiscriminato in quanto divieti e limitazioni valgono nei confronti di tutti e il costo collettivo netto sarà maggiore. Nel caso di vincoli alla circolazione o di strumenti generali di pianificazione, il

razionamento sarà indiscriminato ed il costo collettivo netto sarà complessivamente maggiore. Le azioni per l'equilibrio della domanda e dell'offerta suscitano dibattiti e discussioni sull'attuazione di politiche come il *road pricing*, il *park pricing*, che vengono affrontati attraverso un profilo economico, dell'ingegneria del traffico e dell'impatto sociale.

1.3 La congestione e le tecniche di controllo della domanda

La dimostrazione della superiorità di una politica dei prezzi su una dei vincoli alla circolazione è evidente: in generale un vincolo colpisce indiscriminatamente chi ha elevata utilità a viaggiare e chi ne ha poca; il prezzo, a parità di risultati "fisici" (si pensi all'inquinamento, o alla congestione), consentirà di viaggiare a chi ne ha più urgenza o bisogno, genererà risorse per compensare i viaggi eventualmente esclusi per insufficiente reddito, con vantaggi per tutti, e genererà incentivi al progresso tecnico, nel caso, ad esempio sia mirato direttamente alla riduzione dell'inquinamento.

Di seguito verranno descritte alcune delle politiche di gestione della mobilità di maggiore interesse e verranno riportati alcuni esempi di come tali politiche sono state applicate in vari contesti urbani.

1.3.1 Politiche di regolazione

Alcune di queste politiche vengono adottate di frequente in numerose aree urbane e metropolitane: è il caso della limitazione degli accessi veicolari, dei provvedimenti di circolazione a targhe alterne, della limitazione della durata della sosta.

La limitazione degli accessi (zone pedonali e ZTL) rappresenta la politica maggiormente adottata nel contesto europeo ed italiano. Va notato che tali misure, se non sono accompagnate da misure complementari, come

il potenziamento del servizio di trasporto pubblico la tariffazione della sosta e la limitazione della sua durata, finiscono per spostare il traffico veicolare nelle aree adiacenti piuttosto che influenzare la ripartizione modale.

Molte Amministrazioni adottano la limitazione della durata della sosta fissando un periodo massimo consentito. Ciò è adatto alle zone commerciali a forte domanda o alle zone destinate al pubblico e producendo un incremento della rotazione, offre agli automobilisti una sufficiente opportunità di parcheggio e disincentiva la sosta illimitata. Si evita così che i posti auto siano occupati per lungo tempo da persone che si recano al proprio posto di lavoro (pendolari), tenendo impegnato per molte ore un posto auto con una sola vettura.

1.3.2 Incentivazione di sistemi di mobilità alternativi

Car-pooling (auto di gruppo): tale politica è finalizzata a ridurre i volumi di traffico privato nelle aree urbane aumentando l'efficienza nell'utilizzo dell'auto privata attraverso un aumento del coefficiente di occupazione dei veicoli. In pratica si giunge a tale aumento sia attraverso forme di tariffazione differenziate che mediante forme di riserva della capacità stradale o di sosta per i veicoli ad alta occupazione.

Car-sharing (auto condivisa): consente di impiegare la rete stradale con maggiore razionalità, mediante utilizzo in forma collettiva dei veicoli. A seguito di adesione ad una proposta di associazione, si può utilizzare su prenotazione un veicolo disponibile nel parcheggio più vicino al luogo della richiesta.

Dial and Ride: è un servizio di trasporto a chiamata, in cui veicoli collettivi senza percorso e orario fisso servono gli utenti per mezzo di un sistema centralizzato di prenotazione; la richiesta viene inoltrata telefonicamente al centro di controllo, specificando origine e destinazione dello spostamento, nonché la "finestra temporale" entro cui questo deve

avvenire. Il mezzo più vicino viene conseguentemente dirottato per servire il nuovo utente.

Protezione di flussi non veicolari: tale politica mira al recupero della sicurezza degli spostamenti pedonali e ciclabili nelle aree urbane mediante l'introduzione di misure atte a limitare la velocità dei veicoli a motore.

1.3.3 Politiche a favore del trasporto pubblico

Si tratta di interventi dove una quota della capacità della rete viaria viene destinata fisicamente, tramite corsie riservate, o virtualmente, tramite controllo semaforico, al mezzo collettivo, con una conseguente riduzione dello spazio destinato al modo privato di trasporto.

1.3.4 Politiche di tariffazione

Oggi è necessaria una profonda revisione dei criteri di formazione delle tariffe, che deve essere concepita come una forma di orientamento della domanda. In questo senso sono rivolti i ben noti provvedimenti di *road* e di *area pricing*, in quanto consentono di far pagare all'utente un prezzo proporzionale all'incremento della congestione e dei livelli di inquinamento prodotti localmente in aree selezionate, consentendo al sistema di funzionare in modo ottimale, ovvero minimizzando il costo generalizzato totale. Sotto l'aspetto dell'accettabilità sociale, gli studi sull'applicazione della tariffazione e le esperienze realizzate a livello internazionale individuano come pre-condizioni necessarie per l'accettazione e il successo dell'intervento le seguenti situazioni:

- la predisposizione di modalità di trasporto alternative all'uso dell'auto privata per un efficace soddisfacimento della domanda di mobilità individuale;

- l'utilizzo "visibile" degli introiti provenienti dall'esazione delle tariffe stradali nell'ampliare l'offerta di trasporti e nel migliorare la qualità della vita cittadina.

Se l'obiettivo è quello di trasferire i benefici sociali (derivanti dalla riduzione della congestione e dell'inquinamento da traffico) in vantaggi individuali (come tali percepiti dal singolo utente), solo la diretta percezione del beneficio consente una diffusa accettazione di misure che, se introdotte d'autorità e senza predisporre adeguate alternative allo spostamento "tassato", manifestano invece l'effetto perverso di comprimere la domanda di mobilità, causando conseguentemente un disagio diffuso alla collettività. Pertanto è necessario dedicare una particolare attenzione agli aspetti di comunicazione e informazione del cittadino, sia preventiva, allo scopo di sensibilizzare l'opinione pubblica verso la necessità di intervenire e di far conoscere le soluzioni alternative proposte, sia "in tempo reale", utilizzando strumenti idonei per la messaggistica volta al controllo del traffico.

Fra le varie politiche di tariffazione sono due quelle più applicate o comunque maggiormente studiate: *parking pricing* e *road pricing*.

Il *parking pricing* sta ad indicare una soluzione che va al di là della semplice tariffazione della sosta e comporta una regolamentazione e diversificazione delle tariffe di parcheggio, secondo le aree cittadine e le fasce orarie, con lo scopo di variare alcuni comportamenti dell'utenza secondo le esigenze di controllo della circolazione.

Il *road pricing*, come già espresso, consiste nella tariffazione dell'uso di alcune strade o zone della città, realizzata tramite il riconoscimento dei veicoli in transito e l'imposizione di un pedaggio al passaggio da opportuni punti di controllo. Un particolare tipo di road pricing è il *cordon pricing*, che prevede il pagamento del pedaggio al cordone: l'area interessata dal provvedimento di tariffazione viene delimitata attraverso punti di controllo sulle vie di accesso (teoricamente tutte); la tariffazione viene calcolata dal

sistema centrale all'atto del passaggio. A sua volta la tariffa può essere definita in funzione:

- del tempo, *time charging*, il veicolo paga in funzione del tempo speso nell'area soggetta alla politica di pricing;
- di una tariffa chilometrica, *distance charging*, il veicolo paga in funzione della distanza percorsa nell'area soggetta alla politica;
- del tempo e della distanza, *taxi charging*, in presenza di livelli bassi di congestione la tariffa può essere definita in rapporto alla distanza percorsa, viceversa in presenza di elevati livelli di congestione la tariffa potrà essere definita in funzione del tempo.

In alcuni casi si parla anche di *congestion pricing* o *congestion charging* quando lo scopo dell'applicazione della politica di *road pricing* è la riduzione dei livelli di traffico sulla rete.

1.4 Analisi di esperienze internazionali

Nel mondo già da molti anni sono diffuse svariate politiche di tariffazione dell'infrastruttura viaria e con diverse finalità.

Si riporta di seguito una disamina dei più noti casi internazionali esaminando le politiche tariffarie applicate, le strategie di gestione adottate, l'inquadramento legislativo, gli eventuali problemi emersi durante l'implementazione dei provvedimenti di pricing e alcuni parametri di operatività.

1.4.1 L'esperienza di Singapore

Introduzione e finalità. La prima realtà urbana ad individuare il *road pricing* quale strumento di regolamentazione del traffico è stata Singapore,

che nel 1975 introdusse un primo schema basato sul rilascio, dietro pagamento, di permessi (cartacei) per l'accesso al centro (*Singapore area licensing scheme*), area centrale degli affari, caratterizzata da un'elevatissima concentrazione di attività commerciali e finanziarie, con la precisa volontà di ridurre il traffico, la congestione e l'inquinamento e di migliorare complessivamente la vivibilità della zona; lo scopo finanziario era esplicitamente escluso. Nel 1994 è stato esteso il periodo di tariffazione, con il coinvolgimento delle ore di punta pomeridiane e l'introduzione di differenziazioni orarie in modo da limitare i fenomeni di congestione appena prima e appena dopo i periodi di punta; dal 1998 si è passati ad un sistema di tariffazione automatica (*ERP, electronic road pricing*), che attraverso 42 varchi elettronici controlla l'accesso dei veicoli privati all'area centrale (per una superficie pari a circa 7 km²) comunicando direttamente con appositi dispositivi elettronici montati a bordo di ogni veicolo e dotati di smart card, dalle quali viene prelevato ad ogni passaggio l'importo stabilito.

Tecnologia. La tecnologia adottata prevedeva originariamente l'utilizzo di permessi cartacei, con successivi controlli manuali ad ognuno dei 22 punti d'entrata; i permessi acquisivano forme e colori diversi a seconda del tipo di veicolo e del mese a cui la licenza si riferiva. I ticket potevano essere acquistati in diverse rivendite, ma non in corrispondenza dei varchi d'ingresso all'area. Dal 1995 sono stati progressivamente introdotti i varchi elettronici: inizialmente solamente in alcune ristrette vie d'accesso e successivamente, dal 1998, anche in tutta l'area centrale: essi prevedono un sistema di rilevamento automatico (*ERP*) con scambio d'informazioni con le unità di bordo dei veicoli e l'addebito diretto su carte a scalare; le carte possono essere facilmente ricaricate in punti automatici presso banche, uffici postali e stazioni di carburante e sono utilizzabili anche per molte altre funzioni di pagamento in ambito urbano.

Le auto di visitatori possono affittare le unità di bordo in punti di distribuzione nelle zone strategiche fuori dai varchi. Sono stati installati 41 varchi, 28 nell'area centrale e altri 13 in importanti arterie d'accesso, ma il

sistema è predisposto per funzionare con più di 100 varchi. Il monitoraggio e il sanzionamento avvengono anche in questo caso con apposite telecamere in grado di registrare la targa di coloro che transitano senza le carte anche a velocità elevate. L'affidabilità dei controlli è stimata essere superiore al 99%.

Area coinvolta. L'area coinvolta è costituita dalla zona centrale degli affari (7 km² circa) e dalle principali arterie d'accesso. L'area centrale costituisce il nucleo finanziario e operativo dello Stato: essa contiene solamente il 3% dei residenti totali di Singapore, ma ben il 68% degli uffici e il 50% delle attività commerciali.

Modalità d'accesso. Il periodo orario tariffato è stato volutamente esteso in fasi successive nel corso degli anni. Con l'introduzione del sistema *ERP*, electronic road pricing, è stata inoltre accentuata la variabilità delle tariffe a seconda del tipo di veicolo, dell'ora e della porta d'entrata, con la previsione che esse possano essere riviste ogni quattro mesi in base alle condizioni della mobilità e della velocità del traffico nelle diverse tipologie di strade.

Effetti. Gli effetti registrati sul traffico sono stati sicuramente significativi, anche se con alcuni aspetti particolari. L'impatto iniziale della tariffazione nelle ore di punta è stato notevole con una riduzione del traffico nei periodi tariffati attorno al 45% e un incremento della velocità media da 18 a 35 km/h; la quota modale del trasporto pubblico per gli spostamenti pendolari nell'area centrale è incrementata del 50%. Complessivamente, anche se non va dimenticato che la tariffazione degli accessi è stata accompagnata da altre importanti misure di prezzo (tasse di possesso e di circolazione) e non (vincoli sulla proprietà delle auto), si può ragionevolmente affermare che l'impatto sull'area coinvolta sia stato importante sia dal punto di vista della riduzione del traffico, che da quello del miglioramento della vivibilità.

Accettabilità. L'introduzione originaria dello strumento è stata preceduta da un periodo di più di un anno di campagne informative; anche la transizione al sistema automatico è stata accompagnata da importanti iniziative in tal senso attraverso i mezzi di comunicazione, incontri pubblici

e numeri verdi; vi è stato inoltre un periodo di tre mesi di sperimentazione, senza addebito finale, ma con un contributo notevole alla conoscenza del sistema e dei potenziali costi associati alle proprie scelte di mobilità. Altrettanto importante è stata, come ricordato, la contemporanea riduzione di altre forme di tassazione fissa sulle auto.

1.4.2 L'esperienza di Bergen

Introduzione e finalità. Bergen è stata la prima città europea ad introdurre un sistema di tariffazione degli accessi nel 1986, con la dichiarata volontà di raccogliere fondi per la costruzione manutenzione delle strade e per altri servizi di trasporto locale; esso non è stato quindi inizialmente inteso come strumento di gestione della domanda di mobilità.

Tecnologia. La tecnologia adottata prevedeva inizialmente un'interfaccia attiva, che richiede la fermata dei veicoli, con pagamento manuale. A partire dal febbraio 2004 è entrato in funzione *Q-Free Autopass*, un sistema elettronico per la riscossione dei pedaggi che identifica i veicoli attraverso un'unità montata a bordo. I varchi complessivi d'accesso sono 9 dislocati nelle vie di accesso principale attorno al centro storico che interessa il 10% circa dei cittadini di Bergen.

Area coinvolta. L'area coinvolta è concentrata attorno al centro storico e include una percentuale di circa il 10% dei cittadini di Bergen.

Modalità d'accesso. Esiste solo un'unica tariffa pari a circa 1,78 € per le automobili e 3,56 € per i mezzi pesanti, per la fascia oraria 6:00-22.00 dei giorni feriali. Sono tuttavia disponibili degli abbonamenti mensili, semestrali o annuali a costo ridotto. La struttura tariffaria è stata definita in modo da soddisfare il fabbisogno di risorse per i nuovi investimenti attraverso previsioni sul traffico medio giornaliero. Gli accessi illegali all'area sono monitorati a campione attraverso un sistema di lettura delle targhe con telecamere.

Costi d'implementazione e gestione. L'investimento iniziale nel 1986 è stato di 1,8 milioni di euro, con costi operativi annuali di circa 1,7 milioni di euro, pari a circa il 20% delle entrate. Di quest'ultime l'85% sono destinate a interventi in infrastrutture stradali e il 15% al finanziamento di un fondo speciale, il cui impiego è deciso di volta in volta dalle autorità politiche.

Entrate. Le entrate nette, sono destinate per l'85% ad interventi in infrastrutture stradali e per il 15% al finanziamento di un fondo speciale il cui impiego è deciso di volta in volta dalle autorità politiche.

Effetti. L'applicazione durante i primi 14 anni è stata coerente con le finalità iniziali e ha consentito il finanziamento del master plan di interventi previsto dalle autorità comunali. L'impatto sul traffico è giudicato praticamente nullo: una riduzione del 6-7% tendenziale degli accessi è stata segnalata nei primi anni, senza tuttavia che essa si sia mantenuta nel tempo. È stato stimato che per avere un effetto significativo sul traffico le tariffe dovrebbero essere più che doppie rispetto a quelle attuali.

Accettabilità. Inizialmente due cittadini su tre si sono espressi in maniera contraria al road pricing, anche in relazione al già elevato livello di tassazione a cui è sottoposto il traffico veicolare attraverso le imposte sui carburanti e le altre imposte fisse. Tale percentuale si è andata gradualmente riducendo, sia perché si sono resi visibili i risultati degli investimenti effettuati con le nuove risorse, sia perché l'incremento della mobilità privata e dei problemi ad essa connessi ha diffuso l'idea per cui un accesso non vincolato alle zone centrali non sia più sostenibile.

1.4.3 L'esperienza di Oslo

Introduzione e finalità. La città di Oslo ha introdotto un sistema di tariffazione automatica degli accessi a partire dal febbraio del 1990: la misura, è stata finalizzata esclusivamente al reperimento di risorse per la realizzazione di un insieme complesso e articolato di interventi nel settore dei trasporti, in modo da colmare il gap determinato dagli insufficienti

finanziamenti di provenienza statale e da ridurne a 15 anni il tempo di realizzazione, rispetto ai 35 previsti.

Tecnologia. La tecnologia adottata prevede 19 stazioni, ognuna delle quali consente il pagamento automatico senza fermata e quello manuale (carta prepagata o monete): il 70% dei passaggi avviene normalmente in modo automatico e senza sosta dei veicoli.

Area coinvolta. L'area coinvolta è di dimensioni consistenti: essa contiene più del 55% della popolazione cittadina, che è pari a circa mezzo milione di abitanti; le stazioni hanno una distanza dal centro variabile tra i 3 e i 7 km.

Modalità d'accesso. La tariffa base è unica per tutta la fascia oraria di funzionamento e pari a circa 2,38 € per passaggio. Anche in questo caso sono disponibili abbonamenti a costo ridotto, che danno diritto a un numero illimitato d'accessi per il periodo previsto.

Costi d'implementazione e gestione. I costi operativi annuali sono circa pari all'11% delle entrate annuali lorde.

Entrate. Nel 2004 i ricavi hanno raggiunto i 140 milioni di euro, e attualmente i costi di esercizio rappresentano solo il 10% dei ricavi. Le risorse sono indirizzate per il 70% al finanziamento di infrastrutture di trasporto, per il 25% al trasporto pubblico locale e per il 5% alla realizzazione di piste ciclabili. Rispetto all'esperienza di Bergen si è quindi deciso già dall'inizio di destinare delle risorse anche a progetti e servizi diversi rispetto alle strade, cercando di incrementare la sostenibilità dell'intero pacchetto.

Effetti. L'applicazione durante i primi 10 anni è stata coerente con le finalità iniziali e ha consentito la realizzazione di più della metà dei progetti previsti dal pacchetto del 1990. A livello di ambiente urbano è stata riscontrata la capacità dello strumento e delle opere infrastrutturali realizzate di dare un contributo importante alla riduzione della congestione e dell'occupazione degli spazi, all'incremento dell'attrattività delle zone centrali e al miglioramento dei tempi di percorrenza.

Accettabilità. Un anno prima dell'introduzione del sistema il 70% dei cittadini di Oslo era contrario al road pricing: una percentuale in parte giustificata dallo scarso impegno profuso nelle campagne di sensibilizzazione e informazione precedenti all'installazione; tale valore si è andato progressivamente riducendo ed è oggi pari a circa il 50%. Anche in questo caso i risultati degli investimenti effettuati con le nuove risorse e i miglioramenti ottenuti nell'ambiente urbano hanno contribuito a modificare in parte l'attitudine della popolazione.

1.4.4 L'esperienza di Trondheim

Introduzione e finalità. La città norvegese di Trondheim ha installato un sistema di tariffazione automatica degli accessi nel 1991 a conclusione di un prolungato periodo di discussioni e dibattiti sulle misure più opportune da adottare per risolvere i crescenti problemi urbani associati al traffico e alla congestione; questo esempio di consultazione preventiva sulle principali caratteristiche dello strumento costituisce sicuramente un termine di riferimento importante per iniziative analoghe. Coerentemente con la legislazione nazionale e le altre esperienze precedenti, il *road pricing* è stato ufficialmente introdotto per finanziare opere nel settore dei trasporti e non per influenzare la domanda di mobilità; tuttavia l'esperienza di Trondheim costituisce un caso limite, visto che sin dall'inizio le tariffe hanno visto una differenziazione temporale atta a penalizzare maggiormente la mobilità nelle ore di punta mattutine.

Tecnologia. La tecnologia adottata prevede l'introduzione di un cordone a pagamento, il "*Toll Ring*" con 12 stazioni: ognuna di esse consente il pagamento automatico con tecnologia attiva basata su unità di bordo; è possibile anche il pagamento con carte pre-pagate, con fermata e in due stazioni il pagamento manuale a personale addetto. Le unità di bordo, che consentono il passaggio senza fermata, sono distribuite gratuitamente e prevedono l'addebito diretto in conto corrente delle somme dovute.

Area coinvolta. L'area coinvolta è pari a circa il 40% della popolazione. Viste le particolari caratteristiche di Trondheim, (che è direttamente sul mare), la copertura degli accessi è relativamente semplice e riguarda una sola parte della città.

Modalità d'accesso. L'ingresso al cordone è a pagamento per tutti, tranne che per il trasporto pubblico e per i motocicli. Il periodo tariffato va dal lunedì al venerdì, dalle 6.00 alle 18.00. La tariffa base del pagamento manuale è di circa 1.5 euro per passaggio per le auto e di 3 euro per i mezzi pesanti.

Costi d'implementazione e gestione. I costi d'investimento iniziali nelle stazioni fisse (c.a 7 milioni di euro) sono stati coperti nell'arco di sei mesi; i costi d'esercizio annuali sono inferiori al 10% delle entrate lorde. L'elevata automatizzazione del sistema, con solo due stazioni con personale addetto, ha determinato un'incidenza dei costi d'esercizio molto bassa rispetto al caso di Bergen.

Entrate. Le risorse nette ottenute contribuiscono al co-finanziamento di un fondo indirizzato ad uno piano d'interventi nel settore dei trasporti locali.

Effetti. La riduzione del traffico è valutata attorno al 10% degli accessi nelle ore tariffate, mentre è evidenziato un incremento dopo le 17.00 e nei week-end di circa l'8%; contemporaneamente è segnalato un incremento dei passeggeri del trasporto collettivo del 7-10%.

Accettabilità. Un anno prima dell'introduzione del sistema il 61% dei cittadini era contrario al cordone e il 32% a favore: una percentuale comunque migliore rispetto a quelle delle altre città norvegesi e in parte ricollegabile alla migliore campagna di sensibilizzazione e informazione precedentemente realizzata. Come prevedibile, i giudizi più critici sono stati espressi dai residenti al di fuori del cordone, mentre i più positivi dagli utenti abituali del trasporto collettivo e dei mezzi non motorizzati. Anche in questo caso i risultati degli investimenti effettuati con le nuove risorse e i miglioramenti ottenuti nell'ambiente urbano hanno contribuito a modificare

in parte l'attitudine della popolazione, con la percentuale dei contrari attualmente attorno al 40%.

Prospettive future. L'attenzione e la sperimentazione sono già proiettate alla possibilità di differenziare maggiormente i profili tariffari nel tempo, in base alle condizioni del traffico e degli impatti ambientali, in modo da avere un effetto più rilevante sulla congestione .

1.4.5 L'esperienza di Londra

La *congestion charge* (tassa di congestione) è stata introdotta nella zona centrale di Londra nel febbraio 2003, estesa a partire da febbraio 2007 alla adiacente zona occidentale con quattro obiettivi essenziali: ridurre il traffico, incrementare in modo radicale il servizio di trasporto pubblico di superficie, diminuire i tempi giornalieri di spostamento in auto, aumentare l'efficienza della distribuzione delle merci in città. Oltre agli obiettivi principali prima elencati, diversi altri effetti indotti erano attesi: dall'incremento della mobilità ciclo-pedonale alla diminuzione dell'incidentalità. Gli effetti sul traffico urbano dell'introduzione della *congestion charge* sono stati accuratamente monitorati ("*Congestion Charging Monitoring Programme*") e pubblicati in un report annuale pubblicamente accessibile ("*TfL Annual monitoring Report*").

L'area nella quale si è inizialmente applicata la *congestion charge* il 17 febbraio 2003 è l'area centrale, interna all'*Inner Ring Road*, che copre 21 km²; al suo interno risiedono 202.000 persone (su 7,4 milioni di residenti nella Grande Londra e 2,9 milioni di residenti della cosiddetta Inner London), e lavorano 1 milione e 105.000 persone (poco meno del 30% di tutti i lavoratori dell'area della Grande Londra); sono inoltre presenti 68.000 siti produttivi e commerciali (sui 367.000 della Grande Londra).

Dal febbraio 2007 l'area inizialmente interessata dalla *congestion charge* è stata ampliata fino a ricomprendere un'area di circa 20 km², ad ovest della *city*, (distretti di Kensington, Chelsea e Westminster). Nella

nuova area risiedono circa 120.000 famiglie e una popolazione totale di 230.000 persone. Le attività economiche nell'area impiegano circa 170.000 persone in 18.000 unità.

Nel complesso l'area soggetta a *congestion charge* si estende attualmente su 41 km², coinvolgendo 430.000 residenti e 1.275.000 lavoratori.

Secondo le stime di *Transport for London* dell'aprile 2006 gli effetti indotti dall'attivazione della tassa sono consistenti. In particolare:

- la congestione all'interno dell'area è diminuita del 30%;
- i livelli di traffico si sono ridotti del 18%;
- il numero delle auto è diminuito del 30%, con 65.000 spostamenti in auto in meno;
- gli spostamenti in autobus e taxi sono aumentati del 20%;
- durante le ore di punta del mattino sono aumentati di 29.000 unità gli utenti degli autobus;
- sono migliorati l'affidabilità degli autobus e i tempi di percorrenza: il tempo perso dalle persone in attesa alle fermate a causa dei ritardi o della cancellazione delle corse degli autobus si è ridotto del 20% in tutta Londra e del 30% nella zona interna all'anello o immediatamente al di fuori di esso;
- le linee di autobus che servono la zona all'interno dell'anello registrano un 60% in meno di interruzioni di servizio a causa del traffico.

L'attuazione della tassa di accesso è stata accompagnata da un consistente potenziamento del trasporto pubblico: si stima siano stati acquistati e messi in servizio 400 nuovi autobus urbani, istituite nuove linee, realizzate nuove corsie preferenziali, incrementando le frequenze nelle ore di punta ma potenziando il servizio anche nelle ore notturne.

Contemporaneamente è stato incentivato il ricorso alla bicicletta, sia attraverso specifiche mappe di percorsi ciclabili (oltre 1 milione di copie distribuite) sia con un potenziamento del network di piste ciclabili urbane.

Anche sul fronte delle emissioni inquinanti si è avuto un grande miglioramento, basti pensare che secondo l'archivio del *London Atmospheric Emission Inventory (L.A.E.I.)* l'introduzione del pedaggio ha avuto come effetto una riduzione del 16% delle emissioni di CO₂ all'interno dell'area.

Questa riduzione è stata aiutata dall'introduzione nel 2008 della *Low Emission Zone (LEZ)*, un programma di tariffazione dei mezzi maggiormente inquinanti esteso all'intera area della Greater London. La *LEZ* è attiva tutti i giorni dell'anno, inclusi festivi e prefestivi 24 ore su 24, e interessa gli autocarri, autobus e grandi furgoni di vecchia produzione con motore diesel che non rispondono agli standard Euro 4.

Il totale investito per la nascita della *congestion charge* si aggira intorno ai 162 milioni di sterline, spesi per le misure di gestione del traffico, le campagne di informazione e la messa in esercizio del sistema, ma l'obiettivo del governo inglese è ancora più ambizioso. Infatti, vorrebbe adottare un sistema tecnologico in grado di trasformare il sistema in *link based*, e cioè in grado di applicare una tariffa per ogni chilometro percorso da ogni veicolo, modulata in funzione del periodo della giornata, del tipo di strada e del contesto territoriale

1.4.6 L'esperienza di San Francisco

Nel novembre del 2008, il Consiglio d'Amministrazione della *SFMTA* (*San Francisco Municipal Transport Agency*), attraverso una norma, ha dato il via a un progetto pilota di *parking pricing* denominato *SFpark*.

Si tratta di un sistema per la gestione della disponibilità di parcheggi su strada. Prendendo vigore nell'aprile 2011, il programma utilizza sensori intelligenti di parcheggio che cambiano tariffa a seconda del luogo, l'ora del giorno, e il giorno della settimana, con l'obiettivo di mantenere circa il 15%

di stalli liberi in una determinato isolato. Questo consente di trovare velocemente parcheggio eliminando il traffico parassita con importanti risvolti in termini di congestione veicolare, aumento della velocità commerciale e affidabilità dei mezzi pubblici di superficie, maggiore sicurezza per pedoni e ciclisti, minor numero di incidenti stradali e in generale maggiore vivibilità urbana.

Il sistema ha l'obiettivo di ridurre il tempo ed il carburante sprecato dagli utenti alla ricerca di uno stallone libero. L'utilizzo del parcheggio è monitorato tramite sensori wireless posti sull'asfalto, e la disponibilità degli stalli con la relativa tassazione può essere controllata tramite *smartphone*. I prezzi possono variare da un minimo di 25 cent per un massimo di 6 \$ all'ora durante il normale orario, con un massimo di 18 \$ nei casi di eventi speciali come partite di baseball o fiere di strada.

Il sistema *SFpark* si basa sul principio che il prezzo del parcheggio deve essere calcolato in modo tale che sia sempre disponibile uno stallone per coloro che sono disposti a pagare (Vickrey, 1954; Shoup, 2004, 2006, 2007).

Aspetto importante di questo sistema è che genera la disponibilità di nuovi spazi di sosta ridistribuendo la domanda in funzione dell'offerta di sosta disponibile, indirizzandola verso parcheggi più periferici o verso i garage, inducendo l'utenza a spostarsi a orari diversi o addirittura inducendoli verso l'uso di modalità di trasporto alternative.

1.5 Studio bibliografico e metodologico

È stata condotta un'analisi di noti casi studio internazionali, dalle prime forme di tariffazione dell'infrastruttura viaria alle ultime evoluzioni con la tariffazione della sosta. Questo esprime come, seppur con motivazioni spesso diverse, le politiche internazionali sono sensibili ai temi della riduzione del traffico veicolare privato, della riduzione delle emissioni

inquinanti, della riduzione di esternalità, più in generale sensibili al tema della sostenibilità dei sistemi di trasporto.

Già Vickrey nel 1954 si occupò di tariffe, e in particolare suggerì che il prezzo del parcheggio deve essere calcolato in modo tale che sia sempre disponibile uno stallone per coloro che sono disposti a pagare, suggerendo una percentuale pari al 15% di stalli liberi a tutte le ore del giorno. Tale concetto fu ulteriormente sviluppato da Shoup (2004, 2006, 2007), il quale propone che la tariffa di parcheggio ottima può essere trovata in modo iterativo attraverso un incremento/diminuzione del prezzo iniziale, fino a ottenere un coefficiente medio di occupazione dell'85%, con eventuali variazioni tariffarie per fasce orarie giornaliere. Principio che poi fu applicato nel 2010 a San Francisco (*SFpark*) dando ottimi risultati.

Il modello presentato in questo lavoro è stato formulato partendo proprio dall'analisi dei concetti espressi nella bibliografia scientifica.

Si vuole adesso riportare un cenno di quelle che sono alcune più recenti importanti trattazioni scientifiche sui temi in esame. Trattazioni che hanno ispirato questo studio di tesi e ne hanno definito l'approccio metodologico. Seguirà la metodologia adottata ed implementata nel proporre una tipologia di *parking pricing* per il caso studio della città di Palermo.

1.5.1 *La percezione della congestione della rete tramite l'utilizzo delle tariffe di parcheggio*

Scopo dello studio "The perception of network congestion by using parking fees" di M. Migliore (2002) è la definizione di tariffe di sosta che tengano in considerazione il costo della congestione generata dagli utenti dell'infrastruttura viaria sulla rete e sulle aree di parcheggio.

La procedura seguita da tale studio ha dimostrato come le tariffe di sosta calcolate siano un massimo locale della funzione non convessa che stima il *Surplus* sociale generato dalle tariffe stesse. L'esistenza della

soluzione al problema di punto fisso è stata provata dal Teorema di Brouwer ed è stato proposto un algoritmo per la risoluzione di tale problema. Si è tenuta in considerazione l'elasticità della domanda nel calcolo delle ripartizioni modali.

Si è considerata la tassazione della congestione, il *congestion pricing*, come una particolare forma di *road pricing* che impone alte tassazioni a quegli utenti che con il mezzo privato si spostano nei tempi e nei luoghi caratterizzati da congestione del sistema.

Il principio di tassazione dello studio in esame prevede di internalizzare i costi di congestione della rete a mezzo dei costi percepiti dagli utenti. È pertanto possibile raggiungere l'ottimo di equilibrio tassando ogni utente delle differenze tra i costi marginali sociali e la media dei costi individuali.

Nel campo dello studio dei sistemi di trasporto questa idea è stata per la prima volta applicata al problema dell'assegnazione all'equilibrio in Beckmann (1956) dove è dimostrato l'ottimo del prezzo marginale rispetto ad i costi totali dell'utente in un contesto deterministico mono utente e mono modale con domanda rigida e funzioni di costo separabili. In Bellei (2000) questa idea è stata estesa ad un contesto stocastico multi utente e multi modale con domanda elastica per la scelta modale.

Il metodo implementato nella simulazione del sistema di trasporto non considera il traffico di attraversamento e suppone la presenza di un sistema di trasporto pubblico con corsie riservate che potrebbe soddisfare un livello più alto di domanda.

Per la risoluzione del problema di punto fisso è stato adoperato il metodo delle medie successive (*M.S.A. Method of the Successive Averages*).

È stata condotta un'applicazione della metodologia su di una parte del centro storico della città di Palermo conducendo prima una specifica indagine allo scopo di determinare le caratteristiche della rete stradale e l'offerta di parcheggio. Sono stati adoperati i parametri calibrati in occasione dello studio del Piano Urbano di Palermo per il modello di domanda e per le funzioni di costo degli archi che modellano la rete.

Con una tariffa massima di circa 3 €/h corrispondente al 100% del coefficiente di occupazione degli stalli nell'area maggiormente tassata, la procedura ha provato che tali tariffe di parcheggio costituiscono un massimo locale della funzione non convessa che stima il *surplus* sociale generato dalle stesse tariffazioni.

I risultati hanno infine dimostrato la corrispondenza tra la crescita della funzione *surplus* sociale e la decrescita dei livelli di congestione.

1.5.2 Modelli di ottimizzazione per il problema del parking pricing urbano

Scopo dello studio "*Optimisation models for the urban parking problem*" di L. D'Acierno, M. Gallo e B. Montella (2006) è l'ottenimento di split modali più bilanciati ed il miglioramento della qualità dei sistemi di trasporto tariffando l'utilizzo dell'auto privata attraverso strategie di *road pricing*/o *parking pricing*.

Come anticipato da Pucher (1993) e Kain (1994), gli effetti delle tasse sul parcheggio riescono ad andare oltre il sistema dei trasporti e possono influenzare, direttamente o indirettamente, importanti aspetti socio-economici dell'ambiente urbano. Ad esempio l'accessibilità di alcune zone può essere notevolmente ridotta dall'imposizione delle tasse sul parcheggio.

In generale le strategie di *parking pricing* sono funzione delle zone di destinazione dei flussi di traffico, ed impongono tariffazioni diverse in zone diverse. Una prima proposta di modelli di parcheggio in funzione delle zone la si ritrova in Verhoef et al. (1995) a proposito della gestione dei sistemi *park-and-ride*.

Diversamente nell'articolo in esame si propone l'adozione di una strategia di *parking pricing* basata sia sulle origini che sulle destinazioni degli spostamenti; l'obiettivo principale della politica proposta è che le tariffe di parcheggio possono essere ottimizzate tenendo in considerazione

l'offerta di trasporto su ogni coppia *od*. Quindi l'imposizione delle tariffe sulla sosta dovrebbe tendere ad aumentare per quelle coppie *od* meglio servite dal trasporto pubblico locale ed a diminuire per quelle coppie scarsamente servite dal TPL.

L'ottimizzazione del problema di *parking pricing* è formulata come un problema di ottimizzazione multidimensionale vincolata. Si implementa un *funzione obiettivo* che rappresenta il costo globale della società dovuto al sistema di trasporto che è uguale alla somma di quattro termini:

- costi netti operativi dei sistemi di trasporto;
- introiti dell'amministrazione locale dalla tariffazione imposta (tale termine rappresenta il benefit ed è riportato nella *funzione* con il segno negativo);
- costi dell'utente (monetari e temporali);
- esternalità.

L'ultimo termine, com'è noto, è un indicatore di altri fattori (come l'inquinamento acustico, la qualità della vita) che potenzialmente influenza la scelta dei responsabili politici.

Per la risoluzione del problema di ottimizzazione individuato per le due strategie di tariffazione è stata proposta una soluzione algoritmica meta-euristica articolata in quattro fasi:

- fase 1: esaustiva ottimizzazione monodimensionale;
- fase 2: definizione della soluzione iniziale;
- fase 3: ottimizzazione per quartiere/zona;
- fase 4: stop test o definizione di una nuova soluzione iniziale.

È importante sottolineare che l'algoritmo risolutivo è di tipo euristico e non deve individuare soluzioni di ottimi globali ma soltanto soluzioni di ottimi locali.

L'algoritmo proposto è stato applicato ad una rete test per l'analisi dell'approccio proposto e delle strategie di tariffazione.

Una prima applicazione è stata l'attivazione del modello di ottimizzazione variando il termine β_{TSU} (esprime il valore, espresso in €/h, assegnato ad un utente che passa dall'auto privata al TPL) nella *funzione obiettivo* ed assumendo che è costante per tutte le categorie di utenti e per tutte le strategie di *pricing*. Si individua l'accessibilità come un indice rilevante nella valutazione degli effetti della strategia. Forzare gli utenti all'utilizzo del TPL attraverso le tariffazioni comporta la diminuzione dell'accessibilità. Infatti, la riduzione della congestione stradale dovuta ad un minor numero di utenti comporta una riduzione dei tempi di viaggio non soltanto per gli stessi utenti del mezzo privato ma anche per gli utilizzatori del trasporto pubblico nel caso questo avvenga su sede promiscua (dato che in tal caso della congestione è vittima anche il mezzo pubblico).

Una seconda applicazione è stata condotta fissando il valore del termine β_{TSU} e variando l'offerta di trasporto pubblico ed i parametri di domanda. In particolare l'offerta di trasporto è stata modificata variando le frequenze dei mezzi pubblici. Questa analisi ha dimostrato che in generale la strategia di *parking pricing* basata sia sulle origini che sulle destinazioni degli spostamenti comporta un più alto numero di utenti stradali, delle tariffe medie orarie di sosta più basse e valori più elevati di accessibilità rispetto alle strategie basate esclusivamente sulla destinazione degli spostamenti.

Si conclude affermando che l'algoritmo meta euristico risolutivo del problema di ottimizzazione delle tariffe di parcheggio ha dimostrato che la strategia di tariffazione basata sia sulle origini che sulle destinazioni degli spostamenti comporta una riduzione del tempo di spostamento su strada, una riduzione dei costi di sistema e sociali ed una minore decrescita dell'accessibilità totale, sebbene comporta un minor numero di utenti in transito.

1.5.3 Metodologia proposta

Nel presente studio si vuole definire una zona a traffico limitato con una politica di tariffazione della sosta facendo in modo che un sistema di *parking pricing*, funzione delle zone di destinazione degli spostamenti, riesca a perseguire le stesse finalità di un *road pricing*.

Il processo che si implementerà prevede a mezzo di una procedura *euristica* la risoluzione del problema di punto fisso e l'ottimizzazione di una *funzione obiettivo*, esaustiva delle variabili che entrano in gioco. Risultato sarà l'individuazione dell'ottimo di progettazione espressione della migliore politica di regolazione della sosta implementabile.

A contorno del processo individuato non potranno non implementarsi importanti interventi a contorno, quali il potenziamento del trasporto pubblico locale e la ridefinizione dei sensi di circolazione nelle aree di interesse.

In tale ultima direzione il primo passo sarà l'eliminazione del "traffico di attraversamento" ovvero il traffico che utilizza le infrastrutture presenti all'interno di una determinata zona per raggiungere un luogo terzo. Si tratta pertanto di una componente di traffico che si può indirizzare verso assi esterni all'area presa in esame.

Secondo passo è l'eliminazione del "traffico parassita" cioè quella componente di traffico urbano in cerca di parcheggio. Questa componente non è affatto trascurabile, dato che studi condotti in diverse città del mondo la stimano pari a un terzo del traffico del centro città. Uno dei motivi principali della presenza del traffico parassita è l'eccesso di domanda di parcheggio rispetto all'offerta. Oltre a programmare la costruzione di nuovi parcheggi, il decisore politico nel breve periodo può usare appunto la leva della tariffa di parcheggio per bilanciare domanda e offerta.

Tali risultati possono essere raggiunti attraverso la realizzazione, all'interno dell'area, di "stanze di circolazione" create con il ridisegno dei sensi di circolazione tali da non consentire, o perlomeno scoraggiare, a chi

entra in una stanza di passare a quella limitrofa. Occorre intervenire assegnando un unico senso di marcia agli assi viari principali che delimitano le varie stanze di circolazione per consentire o la sola entrata o la sola uscita dalle stanze. Quindi, all'interno di ogni stanza si propone di adottare, per quanto possibile, la cosiddetta "circolazione a stanze", della quale si parla per la prima volta nella Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n° 2575 dell'8 agosto 1986 (detta Nicolazzi), in cui viene delineato quello che diverrà nel 1995 il Piano Urbano del Traffico. Tale circolare riporta diversi esempi di schemi di circolazione tra cui quello a stanze, che adotta sensi unici contrapposti su entrambe le strade che convergono a un'intersezione. Ciò comporta un allungamento dei percorsi degli utenti che entrano in una "stanza di circolazione" che pertanto, effettueranno tale manovra soltanto se la loro finalità sarà quella di parcheggiare nella medesima stanza.

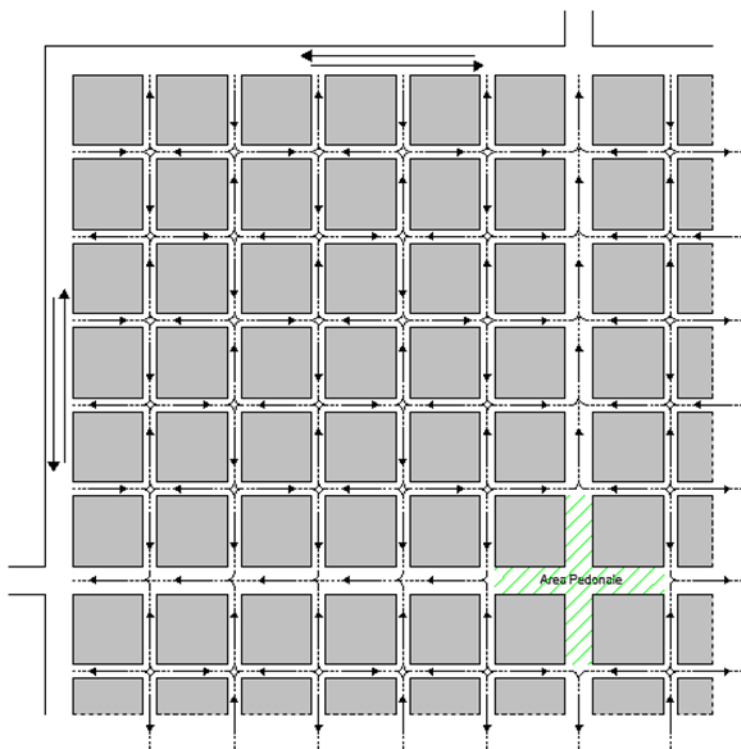


Figura 1.1 - Particolare dello schema di circolazione di cui nella Circolare Nicolazzi

Altro intervento da adottare, a questo punto, è proprio la tariffazione della sosta in modo da raggiungere l'equilibrio domanda-offerta di cui al par. 1.2., generando in tal modo zone a traffico limitato (ZTL) pur non tariffando indiscriminatamente l'ingresso nelle zone di interesse.

Questi sono stati i criteri guida che hanno ispirato la rimodulazione dei sensi di marcia nelle zone soggette a *parking pricing* per il caso studio in esame sulla città di Palermo.

1.5.4 Tecnologia implementabile

In riferimento allo studio di tesi *“La progettazione di interventi per una mobilità sostenibile in ambito urbano”* di A. Lo Burgio (2013) cui il presente lavoro si ispira e che amplia in taluni aspetti, si riporta brevemente la tecnologia implementabile che con contenuti costi di investimento iniziale permetterebbe di gestire efficacemente il sistema di tariffazione della sosta nel centro urbano di Palermo.

Una volta individuate le aree di sosta all'interno della zona oggetto dell'intervento, sia esse su strada sia fuori dalla carreggiata, verrà installata una rete di sensori wireless (uno per ogni stallone) che consentirà di avere un monitoraggio in tempo reale sullo stato di occupazione degli stalli stessi.

Il sistema, fondamentalmente, è composto da tre elementi:

- Nodo sensore;
- Tag veicolare;
- Gateway.

Il nodo sensore ha la funzione di riconoscere l'occupazione dello stallone e se l'automezzo è dotato di identificativo Tag veicolare; il nodo è in grado di comunicare al sistema centrale tale interrogazione, permettendo così di riconoscere l'identità dell'occupante del singolo stallone.

Il sensore è controllato da una CPU in grado di effettuare le letture del campo magnetico terrestre e di gestire le comunicazioni con gli altri sensori e il Tag. Il nodo può essere alimentato con una batteria a sua volta ricaricata da un pannello fotovoltaico in silicio amorfo posto sulla faccia superiore del marker, anch'esso carrabile, che garantisce una durata di vita superiore ai 5 anni.

Il Tag veicolare è un semplicissimo tag (o transponder) a radiofrequenza di tipo passivo, che viene posizionato nel parabrezza all'interno dell'automezzo e ha la funzione di identificare il proprietario del veicolo in sosta, in questo modo si può, oltre a individuare l'utente, conoscere la categoria a cui appartiene il veicolo e le autorizzazioni necessarie per occupare lo stallone; ad esempio, gli stalli riservati ai disabili o per il carico e lo scarico merci. Inoltre, il tag può essere posseduto dai residenti o da utenti abbonati. Tutti gli altri utenti che non posseggono il tag, una volta occupato lo stallone e prima che esso venga dichiarato occupato illegalmente, hanno un lasso di tempo prestabilito (10 minuti ad esempio) per effettuare il pagamento attraverso diverse modalità: applicativo per smartphone, sms con la comunicazione del numero di stallone occupato e il conseguente pagamento attraverso il credito telefonico, schede prepagate utilizzabili attraverso risponditore automatico telefonico (IVR - Interactive voice response), ecc.

Il Gateway, o nodo sink, è il nodo che riceve le informazioni provenienti dalla rete di sensori ed è in grado di trasmettere le informazioni ricevute a un server centrale, tramite rete tipo GSM/GPRS, MAN (Metropolitan Area Network), WAN (Wide Area Network) o a onde convogliate sfruttando la rete elettrica della pubblica illuminazione.

Il sistema siffatto è un sistema molto espandibile, basti pensare di aggiungere alla rete altre tipologie di sensori (rilevatori di dati ambientali, meteorologici, ecc.) che trasmettono i dati tutti alla stessa centrale di controllo per le diverse elaborazioni.

Riassumendo, il funzionamento del sistema proposto è semplice: migliaia di parcheggi dotati di sensori wireless nella pavimentazione, che raccolgono istante per istante le informazioni sulla disponibilità di posti liberi, con le relative autorizzazioni, e le trasmettono al sistema centrale. A questo punto le informazioni vengono utilizzate in modo differente:

- dalla *centrale di controllo*, che ha la visione complessiva sullo stato di occupazione degli stalli e quindi ha i dati necessari per modificare i piani di tariffazione attraverso appositi modelli;
- dagli *accertatori*, ai quali attraverso dispositivi tablet viene segnalata la posizione degli stalli occupati illegalmente, così da poter intervenire tempestivamente, in modo efficace e senza dispendio di forze;
- dagli *utenti*, che attraverso app per smartphone e tablet potranno individuare gli stalli liberi, con la relativa tariffa, e quindi il percorso più breve per raggiungerli.

Il sistema proposto presenta diversi vantaggi sia per gli utenti sia per le amministrazioni locali che saranno chiamate a gestirlo. Per quanto riguarda gli utenti, questi avranno l'opportunità di sapere in modo semplice e veloce dove c'è maggior probabilità di trovare parcheggio e a quale tariffa. Questo riduce notevolmente i tempi di ricerca del parcheggio eliminando il *traffico parassita* e riducendo gli impatti sull'ambiente. Le amministrazioni invece, a seguito di un investimento iniziale, potranno usufruire di un sistema che con la stessa infrastruttura riesce a governare sia la problematica della sosta sia il controllo degli accessi veicolari in aree sottoposte a restrizioni. Inoltre, la tecnologia utilizzata per implementare tale sistema riduce al minimo il numero di persone coinvolte nella gestione anche nella fase di controllo, per cui gli accertatori potranno dirigersi direttamente nei punti in cui il sistema individua l'infrazione.

Una soluzione di questo tipo, introducendo opportunamente le tariffe di sosta all'interno della varie *stanze* e parcheggi, permette di scaricare le aree

che si vogliono liberare dai mezzi privati. Ciò richiede però che le tariffe vengano rimodulate periodicamente, come nel caso di *SFpark*, per evitare che il fenomeno della congestione si sposti semplicemente su altre zone.

Fra gli altri vantaggi, il risparmio economico è forse il più importante. Infatti, un sistema siffatto ha dei costi di impianto sensibilmente contenuti, dato il basso costo dei singoli sensori. Tra le voci di costi più gravose vi è quella relativa alla configurazione del sistema centrale, che si occupa della raccolta dei dati e della comunicazione delle informazioni ai cittadini e al personale addetto al controllo. Proprio grazie alla snellezza della infrastruttura anche i costi di gestione, a parte quelli relativi al personale della sede operativa e di quello addetto al controllo, sono fortemente limitati alla sola manutenzione, ordinaria e straordinaria del sistema.

Infine, un altro punto a favore di questo schema è l'efficienza, infatti, anche se un *nodo sensore* dovesse danneggiarsi si viene a perdere soltanto l'informazione riguardante quello stallo poiché il sistema è in grado di auto-configurarsi facendo a meno di quel nodo nelle operazioni di instradamento delle informazioni.

Questo schema, come d'altronde tutte le politiche di *pricing*, ha come grande problema quello relativo all'accettabilità da parte dei cittadini. Per tale motivo è bene far precedere l'attuazione dello schema con un periodo di prova accompagnato da campagne di informazione e di sensibilizzazione, durante il quale creare un rapporto sereno tra utente e sistema.

CAPITOLO 2

LA MODELLAZIONE DEL SISTEMA DI TRASPORTO

2.1 Premessa

In questo capitolo si analizza, da un punto di vista teorico, la modellazione di un sistema di trasporto, partendo con il classico approccio noto in letteratura scientifica per poi adattare la metodologia al particolare caso studio in esame.

Uno studio sulla mobilità che interessa un sistema di trasporto (esistente o da progettare) avviene secondo le seguenti fasi:

1. individuazione dell'area di studio;
2. suddivisione in zone dell'area di studio (zonizzazione);
3. definizione del modello di offerta del sistema di trasporto;
4. stima (tramite indagini o modelli) della domanda di trasporto che interessa l'area di studio (matrici OD ovvero Origine/Destinazione);
5. simulazione dell'interazione domanda/offerta (calcolo dei flussi di traffico sulle diverse componenti del sistema).

I risultati ottenuti dalla fase 5 (flussi sulle componenti del sistema di trasporto) possono essere utilizzati per effettuare valutazioni sul funzionamento di un sistema esistente o per progettare un nuovo sistema di trasporto. In seguito saranno descritte sinteticamente le singole fasi del processo di modellazione di un sistema di trasporto esistente, seguirà quindi breve trattazione del problema della progettazione di interventi di modifica dell'offerta di trasporto con esempio matematico di modello di progettazione dei prezzi.

2.2 Individuazione dell'area di studio

Si definisce area di studio l'area geografica all'interno della quale si trova il sistema di trasporto (che si intende progettare o sul quale si intende intervenire) e nella quale si ritiene si esauriscano la maggior parte degli effetti degli interventi progettati.

Il confine dell'area di studio è detto cordone: tutto ciò che si trova al di fuori è detto ambiente esterno, del quale interessano solo le interconnessioni con l'area di studio; tali interconnessioni sono rappresentate con dei nodi, detti centroidi esterni, posti in corrispondenza dei punti in cui il cordone "taglia" le infrastrutture di trasporto per l'ingresso e l'uscita dall'area di studio. L'area di studio può essere anche l'intero Paese nel caso di un piano nazionale dei trasporti, un'area urbana o una parte di essa nella quale si intende realizzare un intervento di gestione del traffico.

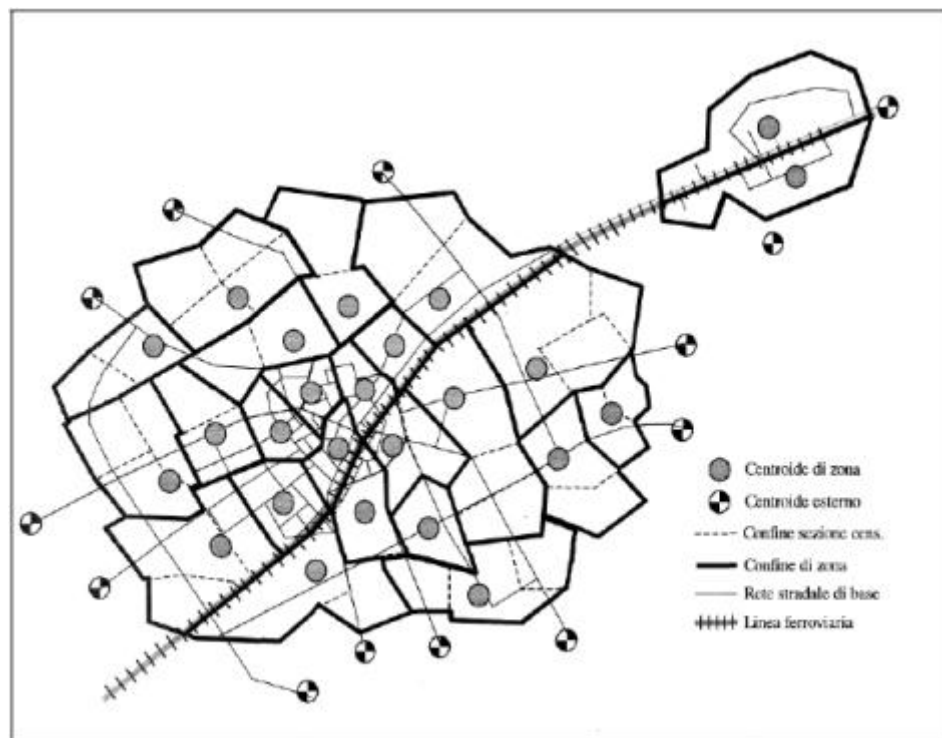


Figura 2.1 – Zonizzazione e rete di base

2.3 Zonizzazione

La zonizzazione consiste nel partizionare l'area di studio in zone di traffico (di numero finito); in questo modo è possibile stimare il numero di spostamenti che si hanno tra una zona di origine O ed una zona di destinazione D . Ad ogni zona si associa un punto (detto nodo centroide) in cui si ipotizza siano concentrati tutti i punti di origine degli spostamenti che hanno origine dalla zona e tutti i punti di destinazione di tutti gli spostamenti che hanno destinazione in quella zona. In questo modo si commette un'approssimazione, che sarà tanto migliore quanto maggiore è il numero delle zone. Il nodo centroide è disposto baricentricamente rispetto alla localizzazione delle residenze e delle attività della zona. La zonizzazione deve essere effettuata in modo da rendere accettabile l'approssimazione di sostituire alla molteplicità di punti di origine (destinazione) della zona un unico punto.

Dal punto di vista applicativo esistono diverse possibili zonizzazioni per lo stesso problema; alcuni criteri da seguire sono:

- i separatori fisici del territorio (fiumi, ferrovie, ecc.) di solito vengono utilizzati come confini di zona, in quanto impediscono un collegamento "diffuso" tra zone adiacenti, ma solo in punti limitati (ponti, sottopassaggi, ecc.)
- le zone di traffico si ottengono, in generale, aggregando le particelle censuarie dell'ISTAT, in modo da poter utilizzare i dati del censimento
- si può adottare un diverso dettaglio di zonizzazione in funzione della diversa precisione che si vuole ottenere; ad esempio zone più piccole nel centro storico e più grandi in periferia
- in generale si tende ad aggregare zone omogenee dal punto di vista insediativi (residenziale, industriale, ecc.).

Ad ogni zona di traffico individuata si attribuisce un numero progressivo ed un nodo centroide, che assume lo stesso numero della zona. Anche i centroidi esterni sono numerati.

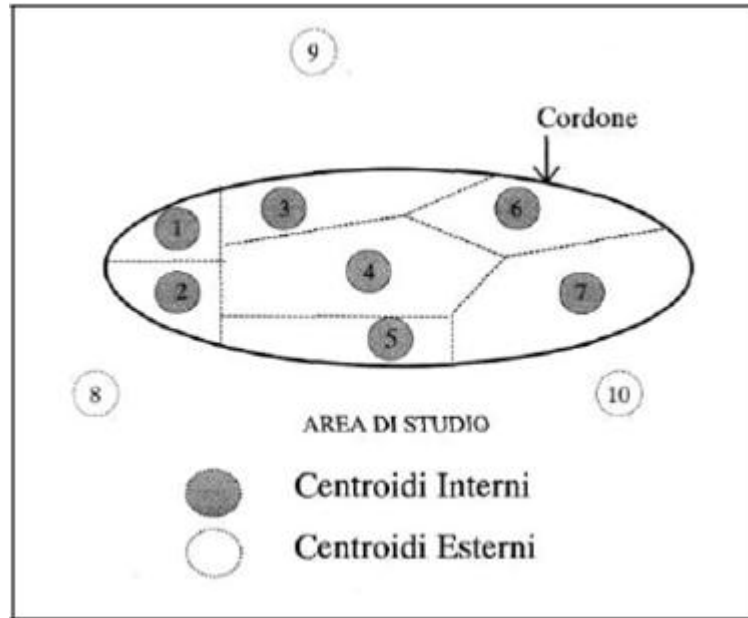


Figura 2.2 – Numerazione della zone

2.4 Definizione del modello di offerta del sistema di trasporto

Per rappresentare in modo semplice ed immediato il sistema di offerta di trasporto lo strumento più idoneo è sicuramente il *grafo*. In generale si definisce *rete* un grafo ai cui archi è associata una caratteristica quantitativa. I grafi a loro volta, sono definiti come una coppia ordinata di insiemi: N , insieme di elementi detti *nodi*, ed L , insieme di coppie di nodi appartenenti ad N , detti *archi* o *rami*. Simbolicamente un grafo G può essere indicato come $G=(N,L)$. I grafi utilizzati per le reti di trasporto sono in generale orientati; ovvero gli archi hanno un verso e le coppie di nodi che li definiscono sono coppie ordinate. Un arco che collega la coppia di nodi (i,j) può essere indicato con un unico indice che ne rappresenta la posizione nella lista di tutti gli

archi del grafo oppure con la coppia di indici (i,j) relativi al nodo iniziale e al nodo finale dell'arco stesso.

In una rete di trasporto e per il modello di offerta ad essa associato, oltre agli archi che rappresentano, come si vedrà in seguito, fasi dello spostamento, si possono definire delle particolari sequenze di archi, detti *percorsi* che rappresentano degli spostamenti dalla origine alla destinazione. Ad archi e percorsi possono poi associarsi due tipi di variabili: *costi e flussi*. Le variabili di arco e di percorso sono collegate fra loro in funzione della topologia della rete alla quale sono relative.

Detti i e j due nodi del grafo, questo si dirà *orientato* se la coppia ordinata (i, j) è diversa dalla coppia (j, i) , si dirà non orientato nel caso contrario. Ad esempio il grafo stradale è solitamente un grafo orientato in quanto i diversi rami stradali hanno un loro verso di percorrenza, e quindi non tutte le coppie (i, j) , per ogni i e j , possono essere utilizzate per rappresentare il collegamento tra i nodi. In un grafo orientato il primo nodo della coppia (i, j) si dice nodo iniziale e il secondo nodo finale.

Un grafo inoltre si dice *connesso* se da ogni nodo è possibile raggiungere tramite un percorso ogni altro nodo del grafo. Infine, un grafo si dice *pesato* se ad ogni arco resta associata una funzione matematica che individua una quantità connessa all'arco.

Ciascun arco del grafo utilizzato per rappresentare un sistema di trasporto corrisponde ad una fase dello spostamento, cioè la percorrenza di un elemento fisico (ad esempio un tronco stradale) e/o una attività connessa allo spostamento (ad esempio l'attesa di un treno ad una stazione); in entrambi i casi l'attraversamento dell'arco è caratterizzato da un tempo di trasferimento e/o da altri oneri sopportati dall'utente. Il *costo generalizzato medio di trasporto*, o più sinteticamente il *costo di trasporto di un arco* è una variabile che sintetizza il valore medio delle diverse voci di costo *sopportate dagli utenti* così *come da loro percepite* nella effettuazione delle scelte di trasporto e, più in particolare, nella scelta del percorso. In altri termini il costo di trasporto di un arco riflette la disutilità degli utenti a percorrere

l'arco stesso (attraversare l'elemento fisico e/o svolgere l'attività rappresentata dall'arco). Gli elementi che compongono il costo di trasporto sono in generale grandezze non omogenee, per esempio tempo di percorrenza, costo monetario, comfort.

Si definisce *vettore dei costi di arco* un vettore \mathbf{c} la cui generica componente c_l è costituita dal costo (generalizzato) di trasporto sull'arco $l = (i, j)$. Il vettore dei costi di arco avrà dimensione $(n_L \times 1)$ dove n_L è il numero degli archi del grafo G . Quindi, un *percorso*, in un grafo rappresentativo dell'offerta di trasporto è una sequenza di archi consecutivi che collegano un nodo iniziale (origine del percorso) ed un nodo finale (destinazione del percorso). Un percorso rappresenta quindi una sequenza di fasi di uno spostamento. Di solito nei grafi che rappresentano sistemi di trasporto si considerano esclusivamente percorsi che collegano fra loro nodi rappresentativi delle zone di traffico o nodi centroidi introdotti; tali percorsi rappresentano quindi una sequenza completa di fasi che consente di raggiungere una certa destinazione partendo da una certa origine. Per quanto detto ogni percorso è univocamente associato ad una e una sola coppia O-D mentre la stessa coppia O-D può essere collegata da più percorsi.

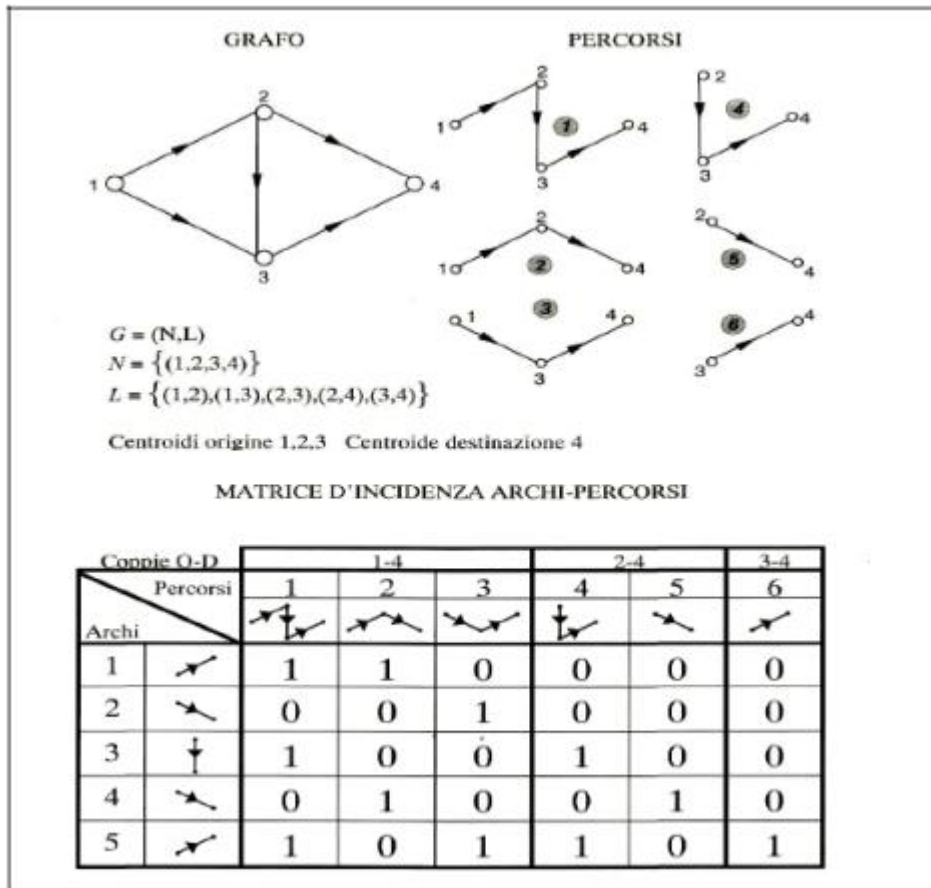


Figura 2.3 – Grafo e matrice archi percorsi

La relazione esistente fra archi e percorsi in un grafo può essere rappresentata con la matrice di incidenza archi-percorsi, A . La matrice A ha tante righe quanti sono gli archi, n_a , e tante colonne quanti sono i percorsi n_p ; il generico elemento che la compone, a_{lk} , vale uno se l'arco l appartiene al percorso k , $l \in k$, vale zero altrimenti, $l \notin k$. La matrice di incidenza archi-percorsi è in definitiva una matrice di elementi binari che può essere "letta" in due modi diversi: se si scorrono tutti gli elementi di una riga corrispondente al generico arco l si possono individuare tutti i percorsi che lo comprendono (colonne k per le quali risulta $a_{lk} = 1$), viceversa se si scorrono gli elementi di una colonna corrispondente al generico percorso k si possono individuare tutti gli archi che lo compongono (righe l per le quali risulta $a_{lk}=1$).

Il concetto di costo generalizzato di trasporto può essere esteso dagli archi ai percorsi. Il costo generalizzato medio di trasporto C_k di un generico percorso k , è definito come una grandezza scalare che sintetizza (omogeneizza) le diverse voci di costo percepite dagli utenti (di una certa categoria) nella effettuazione delle scelte di spostamento e, più in particolare, di percorso.

Se il grafo si utilizza per simulare le caratteristiche di un solo modo di trasporto si definisce monomodale e si considera un unico tipo di utente e di servizio, mentre si dirà multimodale quando è relativo ad un sistema formato da più modi di trasporto (ad esempio auto private e autobus di linea, oppure auto private, autobus di linea e ferrovia), da infrastrutture di diverso livello qualitativo e/o da diversi servizi o categorie di utenti. In questi grafi multimodali devono essere considerati i punti di interscambio o di trasferimento da un modo all'altro. Essi sono in genere rappresentati da più nodi, spesso relativi allo stesso luogo fisico, fra i quali esiste un tempo o più in generale un costo di trasferimento fra i diversi modi di trasporto. Un esempio tipico di punto di interscambio è rappresentato, ancora una volta, dalla fermata di autobus urbani: in tali nodi, infatti, l'utente passa dal modo "piedi" al modo autobus, ed il termine di costo principale considerato è pari al tempo di attesa alla fermata.

La costruzione di un grafo rappresentativo dei collegamenti offerti da un sistema di trasporto richiede la definizione degli elementi che lo costituiscono (nodi ed archi) in funzione delle caratteristiche del sistema fisico che si intende rappresentare, successivamente si dovranno individuare gli elementi che si ritengono significativi ai fini dell'analisi del sistema reale e per i quali si vogliono conoscere flussi e prestazioni.

In ogni caso nodi e archi saranno relativi all'insieme delle infrastrutture e/o ai servizi di trasporto che sono stati individuati come rilevanti. Si tratta in definitiva di rappresentare con un grafo i collegamenti fra le zone di traffico, o meglio fra i centroidi che le rappresentano, consentiti dalla rete di base.

L'insieme degli elementi considerati è anche detta "rete di base" o schema di base ed è, di solito, rappresentata graficamente evidenziando le infrastrutture sulle quali avvengono i servizi di trasporto (assi stradali, ferroviari, stazioni, ecc.). Successivamente, la rete di base sarà trasformata nel vero e proprio modello di offerta di trasporto, nel quale ogni elemento possiederà delle caratteristiche quantitative ben precise (es. tempi di percorrenza, tempi di attesa, costi, ecc.).

Nel grafo rappresentativo di una rete di trasporto stradale i nodi rappresentano punti fisici del territorio e precisamente sono situati in corrispondenza di intersezioni tra diverse strade o in corrispondenza di strozzature su una stessa strada; gli archi orientati rappresentano i collegamenti tra questi diversi punti, cioè tratti di strada con caratteristiche geometriche, funzionali e prestazionali omogenee. Ad esempio, un tratto di strada tra due intersezioni a senso unico è rappresentata con un solo arco, secondo il verso di percorrenza; una strada a doppio senso di marcia è rappresentata con due archi, rappresentativi ciascuno del proprio senso di marcia.

I nodi rappresentativi di intersezioni sono detti nodi reali, per distinguerli dai nodi centroidi; gli archi rappresentativi di tratti di strada sono detti archi reali. I nodi reali sono numerati progressivamente a partire da numeri successivi a quelli utilizzati per i centroidi. I nodi centroidi sono collegati alla rete di trasporto tramite archi fittizi detti archi connettori, rappresentativi degli spostamenti che avvengono per raggiungere la rete di base, a partire dal luogo reale di origine dello spostamento (un esempio è mostrato nella figura seguente).

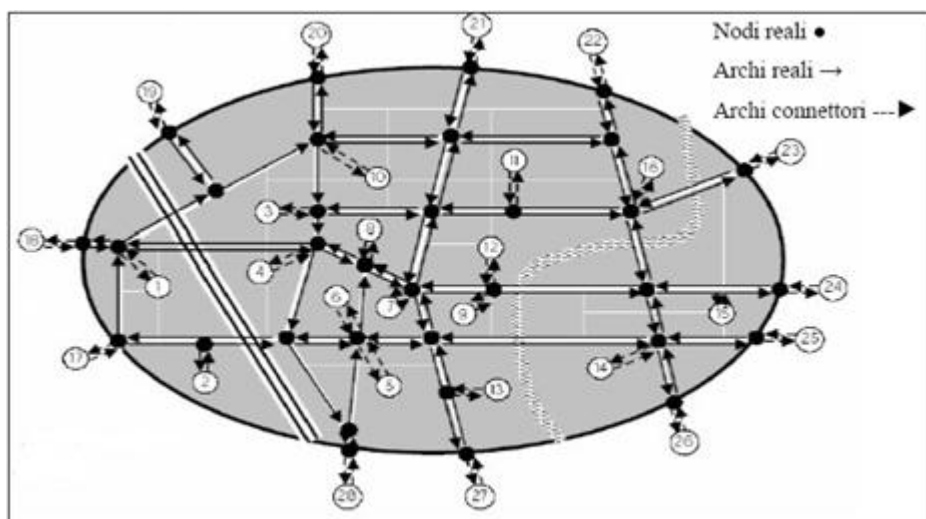


Figura 2.4 – Esempio di modello di offerta per una rete di trasporto privato

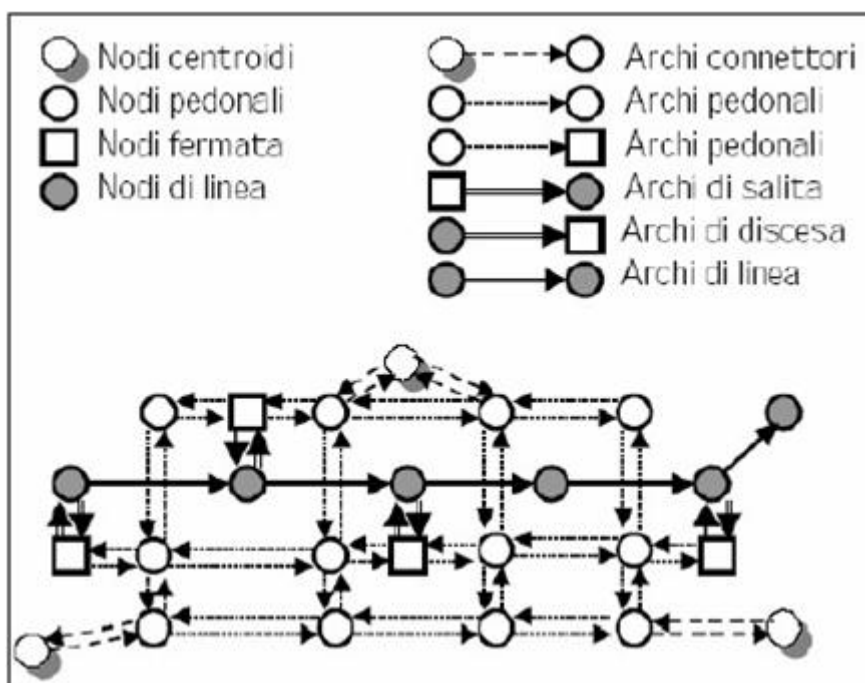


Figura 2.5 – Esempio di modello di offerta per una rete di trasporto collettivo

2.4.1 Le funzioni di costo

Ad ogni arco di un grafo rappresentativo di un sistema di trasporto è attribuita una caratteristica quantitativa. Tale caratteristica può

rappresentare il costo generalizzato sostenuto dall'utente per percorrere quell'arco, o una aliquota dello stesso costo (ad esempio il solo tempo di percorrenza). Tale caratteristica può essere:

- una *costante*; in questo caso si parla di costo dell'arco;
- una *funzione* del numero di utenti sull'arco; in questo caso si parla di *funzione di costo* dell'arco.

Gli archi cui è attribuito un costo indipendente dal flusso di utenti sono detti *non congestionati*; viceversa sono detti *congestionati* gli archi cui è attribuita una funzione di costo. La funzione di costo di un arco è definita come: *"la relazione matematica che lega il costo medio di trasporto ai flussi che lo influenzano ad alle caratteristiche fisiche e funzionali del collegamento rappresentato dall'arco stesso"*.

Per le **reti di trasporto privato** (stradale), in generale, si assume che il costo associato ad un arco sia pari solo al tempo impiegato per percorrerlo.

Per gli *archi connettori* si assume che tale tempo (t_a) sia indipendente dal flusso e pari al rapporto tra la lunghezza dell'arco L_a ed una velocità media di percorrenza v_a :

$$t_a = \frac{L_a}{v_a}$$

Per quanto riguarda gli *archi reali* del sistema di trasporto privato, invece, il software di assegnazione AxE prevede l'applicazione di diverse funzioni di costo:

- funzioni polinomiali *PLN*;
- funzioni del *Bureau of Public Roads BPR*;
- funzioni DOHERTY.

La *funzione PLN* effettua il calcolo di una polinomiale di qualsiasi grado. I parametri da inserire nel foglio di calcolo del software rappresentano i coefficienti dei termini in ordine decrescente di grado. Ad esempio, la scrittura “*PLN 2 1 0 5*”, indica la funzione:

$$2x^3 + x^2 + 5$$

Come caso particolare di polinomiale, si ottiene una funzione costante con l’inserimento di un singolo parametro. Questo consente di associare un costo costante agli archi non congestionati.

Secondo le funzioni *BPR*, descritta in molti testi (Sheffi Y., 1985), il costo del transito su un arco corrisponde al tempo di viaggio:

$$\text{per archi urbani: } t_i = \frac{l_i}{V_{0i}} \left[1 + \alpha \left(\frac{f_i}{C_i} \right)^\beta \right] + T_i$$

$$\text{per archi extraurbani con casello: } t_i = \frac{l_i}{V_{0i}} + \alpha \left(\frac{f_i}{C_i} \right)^\beta + T_i$$

dove:

l_i = lunghezza dell’arco i-esimo;

V_{0i} = velocità a vuoto dell’arco i-esimo;

f_i = flusso sull’arco i-esimo;

C_i = capacità dell’arco i-esimo;

α e β = parametri caratteristici della curva di deflusso associata;

T_i = tempo aggiuntivo dato dalla formula $T_i = l_i \cdot T'$ dove T' è il costo unitario in termini di tempo del pedaggio sull’arco.

La funzione *DOHERTY* considera un modello disaggregato secondo il quale il tempo di percorrenza di un arco si divide in due aliquote, tempo di run t_r e tempo di attesa t_a , ossia:

$$t = t_r + t_a$$

Le formule per il calcolo del tempo di *run* e di *attesa* differiscono a seconda che si tratti di arco urbano o extraurbano:

$$\text{per archi urbani: } t_{ri} = 3,6 \frac{l_i}{V_i} \quad \text{e} \quad V_i = V_{0i} - a \left(\frac{f_i}{L_{ui}} \right)^2$$

dove:

V_{0i} = velocità a vuoto (in km/h);

$a = 0,0001$;

f_i = flusso (in veic/h);

L_{ui} = larghezza utile corrente (in metri).

$$\text{e } t_{ai} = A + \frac{0,55 * 3600}{C_i} * \frac{X}{1 - X} \quad (X \leq 0,95);$$

$$t_{ai} = \alpha + \beta X \quad (X > 0,95)$$

dove:

$A = 0,5(1 - \mu)^2 * c$ essendo μ il rapporto tra il tempo di verde effettivo
e tempo di ciclo $[(v+2)/c]$;

c = tempo di ciclo (in secondi);

C_i = capacità dell'arco (in veic/h);

X = rapporto tra flusso e capacità (f_i/C_i);

$$\alpha = \left| t_{ai} \right|_{X=0,95} - \frac{209 * 3600}{C_i}$$

$$\beta = \frac{220 * 3600}{C_i}$$

$$\text{per archi extraurbani: } t_{ri} = \left[\frac{l_i}{V_{0i}} + \left(\frac{l_i}{V_{ci}} - \frac{l_i}{V_{0i}} \right) * \left(\frac{f_i}{C_i} \right)^3 \right] * 3,6$$

dove:

V_{ci} = velocità a pieno carico (in km/h);

l_i = lunghezza dell'arco;

f_i = flusso (in veic/h);

V_{0i} = velocità a vuoto (in km/h);

$$e \ t_{ai} = T_{si} + 0,5 * \frac{f_i}{N_{cas} * 3600} * \frac{T_{si}^2}{1-X} \quad (X \leq 0,95);$$

$$t_{ai} = T_{si} + T_{si}^2 \left(200 * \frac{f_i}{N_{cas} * 3600} - \frac{180,5}{T_{si}} \right) \quad (X > 0,95);$$

dove:

T_{si} = tempo di servizio al casello (in secondi);

N_{cas} = numero di caselli;

Infine si riporta una possibile formula empirica per il calcolo della velocità in ambito urbano:

$$V_a(f_a) = 31,1 + 2,8L_{ua} - 1,2P_a - 12,8T_a^2 - 10,4D_a - 1,4INT + \\ - (0,000053 + 0,000123X) \left(\frac{f_a}{L_{ua}} \right)^2$$

dove:

L_{ua} = larghezza utile dell'arco in metri;

P_a = pendenza media in %;

T_a = grado di tortuosità della strada in scala [0,1];

D_a = grado di disturbo della circolazione stradale in scala [0,1];

$X = 0$ se è possibile il sorpasso, 1 altrimenti.

I sistemi di **trasporto collettivo** sono rappresentati, in genere, da modelli di rete non congestionata; cioè si ipotizza che il tempo di percorrenza su un arco sia indipendente dal numero di passeggeri che percorrono l'arco stesso.

2.4.2 La modellazione della sosta

Per il tema in oggetto, una volta individuata l'area su cui intervenire si passa alla modellazione della rete viaria con gli elementi appena descritti. In questa fase è importante lavorare sui sensi di marcia della rete viaria principale, per creare le *stanze di circolazione*, e su quella secondaria per realizzare la cosiddetta *circolazione a stanze*. Come già espresso in

precedenza, in questo modo si elimina il *traffico di attraversamento* e quello *parassita*, riducendo drasticamente i tempi di ricerca del parcheggio.

All'interno della singola zona potranno individuarsi aree di sosta con tariffa differente, ad esempio, in funzione della distanza rispetto ai *gate* d'ingresso all'area, del pregio storico e artistico, dell'attrattività, ecc. Per evitare di parzializzare l'area in troppe zone, e creare confusione nell'utente, si dovrà cercare di individuare un numero limitato di zone tariffarie, il cui valore può cambiare nel corso della giornata e/o della settimana.

Sia le aree a parcheggio sia gli stalli su strada, dal punto di vista modellistico, possono essere rappresentati con un arco. In particolare, gli stalli su strada limitrofi o appartenenti allo stesso isolato possono raggrupparsi ed essere rappresentati da un unico arco, in modo da semplificare il più possibile il modello. In modo analogo, anche le aree e le infrastrutture destinate a parcheggio possono essere rappresentate da un arco.

Per l'offerta di trasporto, come già anticipato, si è fatto riferimento al modello definito in *La progettazione di interventi per una mobilità sostenibile in ambito urbano* di A. Lo Burgio (2013) nel quale si è utilizzato il software QGIS, che si è rivelato un valido sostituto dei software specialistici. Per ogni arco della rete, corrispondente a un *record* del database QGIS, si deve indicare il *nodo origine*, il *nodo destinazione*, la *lunghezza* dell'arco, la *velocità a vuoto* V_0 , la *capacità* e la *tipologia* di arco (di rete, connettore, parcheggio, TPL).

Il software AxE, usato per l'assegnazione, non riconosce in automatico la tipologia di arco, quindi, è necessaria una maggior cura nella fase modellazione e nella scelta della funzione di costo associata all'arco stesso. Detto ciò, la modellazione di un'area di sosta si concretizza attraverso un arco, con costo costante e pari alla tariffa associata, collegato da un lato con un arco reale della rete stradale, attraverso un *arco di accesso al parcheggio*, e dall'altro con il *centroide* della zona in cui ricade l'area di sosta, con un arco fittizio.

È importante sottolineare che la funzione di costo associata all'arco parcheggio è una polinomiale con valore costante pari alla tariffa di sosta. Da ciò, emerge immediatamente che non si tiene conto della congestione del parcheggio e del costo che questa provoca all'utente in termini di tempo e disagio nella ricerca del parcheggio. Ciò è assolutamente vero, ma nel modello proposto si è voluto internalizzare la sovrasaturazione del parcheggio all'interno della tariffa di sosta. In altre parole, essendo lo scopo di questo studio quello di trovare una tariffa ottimale di parcheggio che in generale produce una riduzione del carico di sosta in una determinata area, non inserire nell'arco parcheggio una funzione che tenga conto del livello di saturazione consente di controllare meglio questo fenomeno, facendolo dipendere dalla sola variazione tariffaria. Inoltre, come si vedrà più avanti, avendo inserito nella funzione obiettivo il vincolo di rispetto di una certa percentuale di stalli liberi all'interno di ogni singola area, le configurazioni che risulteranno ammissibili garantiranno la riduzione dei tempi di ricerca del parcheggio e la certezza che l'utente possa trovare uno stallone libero, eliminando in tal modo il traffico parassita. Se, invece, nell'arco parcheggio si inserisse una funzione in cui il costo dell'arco tiene conto anche del grado di saturazione (Migliore, 2002), allora, si verrebbe a perdere la dipendenza diretta tra il carico sul parcheggio e la tariffa, rendendo il tutto più difficile da governare. Questo si verificherebbe poiché la distribuzione dell'utenza tra i vari parcheggi a disposizione (che dovrebbe essere influenzata dalla sola tariffa di sosta attribuita al parcheggio) dipenderebbe anche dal livello di congestione presente.

2.5 La domanda di mobilità

La mobilità è contraddistinta, in termini di spostamenti urbani e su lunga distanza, dalla necessità degli individui di svolgere attività che hanno una localizzazione in genere diversa dal luogo di origine dello spostamento

stesso. La domanda di mobilità (o domanda di trasporto) può essere formalmente definita come il numero di utenti con determinate caratteristiche che usufruisce del servizio offerto da un sistema di trasporto in un periodo di riferimento prefissato (ora, giorno, e l'ampiezza di tale periodo dipende dallo scopo dell'analisi). L'unità di misura della domanda di mobilità è utenti/tempo, ad esempio: *trasporto stradale individuale* (veic/h), *trasporto ferroviario e trasporto stradale collettivo* (pass/h). Per tutte le tre tipologie di trasporto si può anche parlare di spostamenti/h. La domanda di mobilità è, pertanto, un flusso di spostamenti.

Lo studio della domanda di mobilità serve a determinare i flussi sulle reti di trasporto, intesi, come il numero di utenti che si serve di un sistema di trasporto esistente o che si servirebbe di un sistema di trasporto da progettare. Stimata la domanda di trasporto è possibile pertanto, verificare il funzionamento di un sistema di trasporto già esistente o da progettare.

2.5.1 Metodologia di stima della domanda di trasporto

Oltre ad avere una caratterizzazione temporale, la domanda è anche spazialmente definita, in quanto gli spostamenti devono essere suddivisi per luogo di Origine e di Destinazione, e danno origine alle cosiddette matrici di domanda (matrici O/D). Una matrice OD rappresenta gli spostamenti che interessano l'area di studio, in un determinato periodo di tempo, suddivisi per luoghi (zone) di origine e di destinazione e per modo. Pertanto, la matrice OD è una matrice, con un numero di righe e di colonne pari al numero di zone più il numero di centroidi esterni. Il generico elemento d_{od} della matrice rappresenta il numero di spostamenti che, nell'unità di tempo considerata, hanno origine nella zona O e destinazione nella zona D (rappresenta, pertanto, un flusso di spostamenti).

La somma degli elementi della i -esima riga rappresenta il totale dei flussi emessi dalla zona i -esima nell'unità di tempo, ed è detto flusso "emesso" o "generato" dalla zona:

$$d_o = \sum_d d_{od}$$

Analogamente si può definire un flusso "attratto" dalla zona D come:

$$d_d = \sum_o d_{od}$$

Il numero totale di spostamenti che interessano l'area di studio nell'unità di tempo considerato è dato dalla somma di tutti gli elementi della matrice OD:

$$d = \sum_o \sum_d d_{od}$$

La matrice OD può essere partizionata in quattro settori, in relazione al tipo di zona di origine e di destinazione ed è possibile distinguere tre tipi di spostamenti che interessano un'area di studio urbana:

- *spostamenti interni*: gli spostamenti con origine e destinazione entrambe interne all'area di studio; in particolare, gli spostamenti che hanno origine e destinazione all'interno della stessa zona sono detti intrazonali (essi non sono simulabili dal modello), gli altri sono detti interzonali;
- *spostamenti di scambio*: spostamenti con origine e destinazione una all'interno e l'altra all'esterno dell'area di studio, si dividono in spostamenti di scambio I-E (interni-esterni) ed E-I (esterni-interni);
- *spostamenti di attraversamento*: spostamenti con origine e destinazione entrambe esterne all'area di studio, ovvero ne utilizzano il sistema di trasporto.

		Zone di destinazione									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zone di origine	1	•							spostamenti di scambio interno-esterno (I-E)		
	2		•								
	3			•							
	4				•						
	5					•					
	6						•				
	7							•			
	8	spostamenti di scambio esterno-interno (E-I)							spostamenti di attraversamento (E-E)		
	9										
	10										

• = spostamenti intrazonali

Figura 2.6 – Schematizzazione matrice origine destinazione

Le matrici OD possono essere caratterizzate in funzione delle caratteristiche degli spostamenti rilevanti ai fini dell'analisi:

- unità temporale di riferimento (ora, fascia oraria, giorno, anno);
- periodo di tempo di riferimento (ora di punta, giorno della settimana);
- modo dello spostamento (piedi, auto, autobus, ecc.);
- motivo dello spostamento (Casa-Lavoro, Casa-Acquisti, ecc.)

La domanda di mobilità è variabile nel tempo; ad esempio, il numero di spostamenti che avvengono in un'area urbana sono diversi da un'ora all'altra della giornata, ma sono diversi anche nella stessa ora di due giorni diversi. La dinamica temporale della domanda di mobilità può essere studiata su tre orizzonti temporali:

- variazioni di lungo periodo o trend;
- variazioni nel corso di un determinato periodo di riferimento;
- variazioni fra intervalli di tempo di identiche caratteristiche.

La domanda di mobilità può essere stimata utilizzando:

- indagini dirette
- modelli matematici

Le *indagini dirette* consistono nel rilevare le caratteristiche attuali della domanda di mobilità mediante conteggi di traffico e/o interviste agli utenti del sistema di trasporto.

I *modelli matematici* consentono di stimare la domanda di mobilità attuale e futura, in funzione di caratteristiche socio-economiche e territoriali dell'area di studio e del sistema di trasporto in essa operante. La calibrazione dei modelli matematici si basa, comunque, su risultati di apposite indagini sulla mobilità; i risultati di alcune tipologie di indagine (conteggi dei flussi di traffico) possono, inoltre, essere utilizzati per migliorare le stime di matrici OD ottenute tramite modelli o tramite altre tipologie di indagine.

Le principali metodologie di indagine sulla domanda di mobilità sono:

- indagini sui flussi di traffico;
- indagini su aree ristrette;
- indagini al cordone;
- indagini su aree vaste;
- indagini sulla domanda di sosta;

Tranne le indagini sui flussi di traffico, tutte le indagini sono di tipo campionario, cioè sono rivolte solo ad un sottoinsieme (campione) del totale di persone interessate dallo studio (universo). Il campione deve essere sempre estratto a caso.

Le indagini sui flussi di traffico sono indagini tese a rilevare l'entità e la composizione del flusso di traffico che, in un determinato periodo di tempo,

attraversa una prefissata sezione del sistema di trasporto. I risultati dell'indagine forniscono informazioni utili per:

- verificare il funzionamento del sistema di trasporto corrente;
- verificare la capacità dei modelli (domanda, offerta ed interazione domanda/offerta) di riprodurre la realtà;
- tarare i modelli matematici per la stima della domanda;
- migliorare le matrici OD ottenute con modelli o indagini su aree vaste;
- individuare la variazione temporale della domanda di trasporto nel corso della giornata (individuazione dell'ora di punta).

Un *modello matematico* per la stima della domanda di mobilità, è una funzione matematica che pone in relazione la distribuzione e la tipologia di attività sul territorio (ATT), le caratteristiche socio-economiche dei residenti (SE) e le caratteristiche del sistema di offerta di trasporto (T). Si può quindi esprimere il modello di domanda come:

$$d = f(ATT, SE, T)$$

dove d rappresenta la domanda di trasporto sul territorio.

Per modellare la domanda di trasporto si ipotizza che ogni spostamento sia il risultato di una serie di scelte effettuate dall'utente del sistema di trasporto.

Si considerano in genere 4 "dimensioni" si scelta:

- 1) scelta di effettuare o meno lo spostamento;
- 2) scelta della destinazione dello spostamento;
- 3) scelta del modo di trasporto;
- 4) scelta del percorso.

Per motivi di trattabilità analitica si fattorializza il modello di stima della domanda nel prodotto di 4 sottomodelli, ciascuno relativo ad una sola dimensione di scelta; il modello così ottenuto è detto *modello a 4 stadi*:

$$d_{od}(s, m, k) = d_o(s) \cdot p(d/os) \cdot p(m/ods) \cdot p(k/mods)$$

In questo modello il numero di spostamenti dall'origine "o" alla destinazione "d" per il motivo "s", con il modo "m" e sul percorso "k", è espresso come prodotto del numero di spostamenti emessi dall'origine "o" per lo scopo "s" [$d_o(s)$], per la frazione di tali spostamenti che si reca alla destinazione "d" per il motivo "s" [$p(d/os)$], per la frazione di spostamenti che usa il modo "m" per recarsi in "d" per il motivo "s" [$p(m/ods)$], per la frazione che utilizza il percorso "k" relativo al modo "m" per recarsi in "d" per il motivo "s" [$p(k/mods)$]. Le suddette frazioni possono essere viste come percentuali o come probabilità di scelta.

I quattro sottomodelli così ottenuti sono noti come:

$d_o(s)$ modello di emissione o generazione

$p(d/os)$ modello di distribuzione

$p(m/ods)$ modello di scelta modale

$p(k/mods)$ modello di scelta del percorso (o di assegnazione).

I modelli di domanda possono a loro volta essere classificati in:

- *comportamentali*, se derivano da esplicite ipotesi sul comportamento degli utenti;
- *descrittivi*, se descrivono le relazioni tra la domanda di trasporto e le variabili socioeconomiche, territoriali e di livello di servizio.

In generale, nel modello a quattro stadi, il sottomodello di generazione è tipicamente descrittivo, quello di distribuzione è descrittivo, ma può anche

avere un'interpretazione comportamentale, il sottomodello di scelta modale è tipicamente comportamentale, e infine la scelta del percorso è simulata con un modello comportamentale. Quest'ultimo, solitamente, viene implicitamente utilizzato nelle procedure di *assegnazione* che consentono di ottenere i flussi sugli archi della rete di trasporto data la matrice O/D e il sistema di offerta.

2.5.2 L'approccio dei modelli descrittivi

Solitamente l'approccio *descrittivo* si utilizza per i modelli di *emissione*. Per dare un breve cenno su tale metodo, si immagini di avere un'area composta da N zone. Ogni zona i ha una popolazione π_i nota e una distanza d_{ij} da ciascuna altra zona j , nota anch'essa. Ovviamente, si tratta di valori medi, dato che le zone non sono dei punti, ma hanno un'estensione.

L'intervallo di tempo che si vuole descrivere viene convenzionalmente diviso in F fasce orarie, durante le quali si assume che tutte le caratteristiche rilevanti per il modello rimangano costanti: i tempi di viaggio sulla rete stradale, le tariffe dei mezzi, le caratteristiche dei servizi e sulla popolazione, ecc. Bisogna anche fissare i K motivi dello spostamento, che possono essere ad esempio: lavoro, studio, svago, ecc. A queste categorie sono legati degli indici statistici b_{kl} , detti *indici di emissione*, che stabiliscono per ogni motivo k e per ogni fascia oraria l , ma eventualmente anche per ogni categoria di utente, il numero medio di spostamenti che un individuo compie. Si noti che questi indici possono anche essere maggiori di 1, nel caso in cui molte persone compiano più spostamenti per lo stesso motivo durante una fascia oraria. Quest'ultimo è un caso raro, a meno che le fasce orarie siano piuttosto larghe e il motivo forte, ad esempio: molte persone si recano sul posto di lavoro due volte al giorno, perché tornano a casa all'ora di pranzo. Gli indici di emissione solitamente vengono stimati attraverso *indagini RP*

Revealed Preference (metodo delle Preferenze Rivelate) sulle abitudini degli individui che abitano l'area in esame.

Quindi, il modello di *emissione* può essere formalizzato nel seguente modo:

$$g_{ikl} = \pi_i b_{kl}$$

dove π_i è la popolazione e b_{kl} è l'*indice di emissione* per la zona i -esima.

2.5.3 L'approccio dei modelli comportamentali

I modelli comportamentali più utilizzati per la simulazione della domanda di trasporto sono quelli che appartengono alla famiglia dei *modelli ad utilità casuale*. Questi si basano sull'ipotesi che l'utente sia un decisore razionale, e che effettui le sue scelte massimizzando l'utilità che egli associa ad ogni alternativa; inoltre, per una serie di cause di diverso tipo, non è possibile prevedere con esattezza la scelta che egli farà, ma soltanto calcolare la *probabilità* che egli faccia una determinata scelta.

Più in dettaglio, le ipotesi di base dei *modelli ad utilità casuale* sono le seguenti:

- a) il generico utente " i " nell'effettuare la propria scelta considera tutte le alternative a sua disposizione, che appartengono al suo *insieme di scelta*, I_i ; tale insieme di scelta può essere diverso da utente ad utente (si pensi ad esempio ad una persona sprovvista di patente o di autovettura che non avrà a sua disposizione il mezzo privato come modo di trasporto).
- b) l'utente " i " associa ad ogni alternativa del suo insieme di scelta un valore di utilità percepita, U_{ij} , e sceglie l'alternativa con la massima utilità; tale utilità risulta una funzione degli attributi che caratterizzano l'alternativa stessa, x_{kj} , e di alcuni parametri da stimare, β_k . Gli attributi x_{kj} che caratterizzano l'alternativa possono

essere distinti in più classi. Si parla di *attributi di livello di servizio*, che sono quelli propri del sistema di trasporto (tempi, costi, comfort, etc.), di *attributi del sistema delle attività*, che sono quelli che dipendono dall'uso del territorio dell'area di studio (per es., numero di negozi o numero di scuole in una zona), e di *attributi socio-economici*, che sono quelli propri dell'utente o del gruppo familiare cui appartiene (possesso di patente, numero di autovetture possedute in famiglia, etc.). Si possono distinguere, inoltre, attributi *generici* e attributi *specifici* per ogni alternativa: I primi sono presenti in tutte le alternative nella stessa forma e con lo stesso peso (β_k), mentre i secondi sono presenti solo in alcune alternative, oppure sono valutati in modo diverso per ogni alternativa;

- c) l'utilità che il generico utente "i" associata ad ogni alternativa è una variabile aleatoria, in quanto essa non è perfettamente nota all'analista né per quanto riguarda la forma funzionale, né per quanto riguarda il suo valore esatto; ciò dipende sia dai limiti propri della modellizzazione, sia dalle caratteristiche stesse dell'utente, le cui scelte e le cui valutazioni possono subire modifiche difficilmente modellizzabili. Infatti, utenti con le stesse caratteristiche (e quindi con lo stesso vettore di attributi nell'utilità) possono avere gusti diversi o percepire diversamente l'alternativa, oppure possono valutare soggettivamente in modo diverso alcuni attributi, per cui le loro scelte saranno piuttosto varie nonostante l'apparente omogeneità. Inoltre, alcuni attributi considerati dall'utente nel compiere la scelta possono non essere stati inclusi dall'analista, oppure inclusi solo in modo approssimato (in alcuni casi ciò è dovuto all'impossibilità di misurare quantitativamente alcuni attributi, quali il comfort o la sicurezza stradale).

L'utilità U_i si può scomporre in due aliquote: la prima, detta utilità sistematica (o utilità media), indicata con V_i , è costante per tutti gli

utenti con lo stesso vettore di attributi, e la seconda è un residuo aleatorio ε_j :

$$U_{ij} = V_{ij}(X_{ij}) + \varepsilon_j$$

Per quanto riguarda la forma funzionale per l'utilità sistematica, quella più utilizzata è di tipo lineare:

$$V_j^i = \sum_k \beta_k x_{kj}^i$$

essendo x_{kj}^i il k-esimo attributo della j-esima alternativa per l'utente i , e β_k i parametri da stimare. L'introduzione del residuo aleatorio nell'utilità U_{ij} tiene conto del fatto che l'utente ha una personale percezione dell'alternativa, e le sue scelte avvengono in modo non perfettamente prevedibile dall'analista, per cui è possibile solo calcolare la probabilità che egli faccia una determinata scelta.

In base alle ipotesi fatte, la probabilità che l'utente i scelga l'alternativa j , tra tutte quelle appartenenti al suo insieme di scelta I_i , è pari alla probabilità che l'utilità percepita dell'alternativa j sia la maggiore tra le utilità percepite associate alle altre alternative diverse da j , cioè:

$$p^i(j) = \text{Prob}[U_j^i > U_k^i] \quad \forall k \neq j \quad j, k \in I_i$$

ovvero:

$$p^i(j) = \text{Prob}[V_j^i - V_k^i > \varepsilon_k^i - \varepsilon_j^i] \quad \forall k \neq j \quad j, k \in I_i$$

Si evince che la probabilità di scelta di un alternativa è una funzione dei valori delle utilità sistematiche di tutte le alternative concorrenti. L'espressione di tale probabilità dipende dalla legge di distribuzione dei residui aleatori.

Uno dei modelli di utilità casuale più diffusi è il modello *Logit multinomiale* adottato nella fase distributiva e in quella di scelta modale, nel quale il residuo aleatorio segue una distribuzione di Weibull-Gumbel:

$$p^i(j) = \frac{e^{V_j^i}}{\sum_j e^{V_j^i}}$$

Nel caso del *modello di distribuzione*, il *Logit multinomiale* può scriversi come segue:

$$a_{ijkl} = \frac{s_{jkl} \exp(-\beta_k \cdot d_{ij})}{\sum_{r=1}^{|N|} s_{rkl} \exp(-\beta_k \cdot d_{ij})}$$

dove:

a_{ijkl} = *indice di distribuzione* per il motivo k e la fascia l ;

d_{ij} = distanza tra le zone;

β_k = parametri da stimare;

s_{jkl} = *dimensione complessiva dei servizi* della zona j .

L'espressione che segue misura la dimensione complessiva dei servizi che rispondono a un certo motivo in una certa zona e fascia oraria.

$$s_{jkl} = \sum_{p \in S_{jk}} s'_p \frac{\max[\min(f_l, b) - \max(f_{l-1}, a)]}{f_l - f_{l-1}}$$

dove:

s'_p = dimensione di un singolo servizio;

s_{jk} = dimensione dell'insieme dei servizi che rispondono al motivo k e

Si tratta di sommare le dimensioni dei singoli servizi moltiplicate per un fattore (compreso fra 0 e 1) che dice quanta parte della fascia l , che va da f_{l-1} a f_l ricade nell'orario di apertura $[a; b]$.

A questo punto si può formulare una stima degli spostamenti sull'area, ma senza specificare i mezzi usati per compierli. Si procede quindi descrivendo, con un secondo modello *Logit multinomiale*, la scelta del modo di trasporto, e cioè un modello di *scelta modale*, che verrà illustrato nel capitolo seguente entrando nel merito dell'applicazione sul caso studio di Palermo.

2.6 L'interazione domanda/offerta

Con la simulazione dell'interazione domanda/offerta è possibile, a mezzo dei modelli di assegnazione calcolare i flussi sulla rete di trasporto, in funzione dei costi di percorso, note le caratteristiche della domanda di trasporto (matrici OD) e le caratteristiche dell'offerta di trasporto (grafo della rete). Tali modelli sono anche detti modelli di interazione domanda/offerta e sono tutti comportamentali.

In generale si assume che le variabili influenzanti la scelta del percorso siano sostanzialmente degli attributi di livello di servizio di segno negativo, ovvero dei costi (tempo di percorrenza, costo monetario). Per tale motivo in tali modelli si fa riferimento non più ad una utilità percepita U_k ma ad un costo percepito C^k relativo al percorso k . Tale costo percepito può essere espresso come:

$$C^k = C_k + \varepsilon_k$$

dove C_k è il costo percepito medio.

Si utilizzi la seguente notazione:

d_{od} = il flusso di domanda (veic/h ad esempio) tra l'origine o e la destinazione d

k = un generico percorso che connette la coppia od

F_k = il flusso di veicoli sul percorso k (veic/h)

$p_{k,od}$ = la probabilità che gli utenti che devono muoversi da o a d scelgano il percorso k

Si ha la seguente relazione:

$$F_k = p_{k,od} d_{od}$$

Il flusso sull'arco i , f_i , è pari alla somma dei flussi di percorso, F_k , che hanno quell'arco in comune:

$$F_i = \sum_k a_{ik} F_k = \sum_{od} \sum_k a_{ik} p_{k,od} d_{od}$$

dove: $a_{ik}=1$ se l'arco i appartiene al percorso k ; $a_{ik}=0$ se l'arco i non appartiene al percorso k .

La sommatoria estesa a tutte le coppie od è necessaria in quanto un arco può appartenere anche a percorsi che connettono coppie od differenti.

Il modello di assegnazione può essere rappresentato in maniera sintetica con una rappresentazione matriciale/vettoriale, introducendo le seguenti notazioni:

n_a = numero degli archi

n_p = numero di percorsi

n_{od} = numero di coppie od

\underline{F} ($n_p \times 1$) = vettore dei flussi di percorso

\underline{f} ($n_a \times 1$) = vettore dei flussi di arco

\underline{d} ($n_{od} \times 1$) = vettore di domanda di trasporto

$\underline{\underline{A}}$ ($n_a \times n_p$) = matrice di incidenza archi/percorsi

$\underline{\underline{P}}$ ($n_p \times n_{od}$) = matrice delle probabilità di scelta del percorso

Con queste notazioni si può scrivere:

$$F_k = p_{k,od} d_{od} \Rightarrow \underline{F} = \underline{P} \underline{d}$$

$$F_i = \sum_k a_{ik} F_k \Rightarrow \underline{f} = \underline{\underline{A}} \underline{F}$$

$$F_i = \sum_{od} \sum_k a_{ik} p_{k,od} d_{od} \Rightarrow \underline{f} = \underline{\underline{A}} \underline{\underline{P}} \underline{d}$$

Ad ogni arco e ad ogni percorso di una rete di trasporto è associato un costo; in generale, si indica con C_k il costo del generico percorso k e con c_i il costo del generico arco i .

I costi di percorso e di arco possono essere anche essi ordinati in vettori:

\underline{C} ($n_p \times 1$) = vettori dei costi di percorso

\underline{c} ($n_a \times 1$) = vettori dei costi di arco

Il costo del generico percorso k è dato dalla somma dei costi degli archi che lo compongono:

$$C_k = \sum_i a_{ik} c_i$$

dove: $a_{ik}=1$ se l'arco i appartiene al percorso k ; $a_{ik}=0$ se l'arco i non appartiene al percorso k .

Ricordando la definizione data precedentemente della matrice d'incidenza archi/percorsi, si può scrivere:

$$\underline{C} = \underline{A}^T \underline{c}$$

dove \underline{A}^T è la trasposta della matrice d'incidenza.

La probabilità di scelta del percorso $p_{k,od}$ è funzione dei costi di percorso, C_k , di tutti i percorsi che connettono la coppia od , e, pertanto, di tutti i percorsi sulla rete ($p_{k,od}=0$ per tutti i percorsi che non connettono la coppia od):

$$p_{k,od} = p_{k,od}(\underline{C})$$

Riferendosi all'intera matrice delle probabilità di scelta del percorso, si ha:

$$\underline{P} = \underline{P}(\underline{C})$$

e pertanto:

$$\underline{F} = \underline{P}(\underline{C})\underline{d}$$

$$\underline{f} = \underline{A}\underline{P}(\underline{C})\underline{d} \quad \text{ovvero} \quad \underline{f} = \underline{A}\underline{P}(\underline{A}^T \underline{c})\underline{d}$$

Queste due relazioni legano tra loro i flussi di percorso, \underline{F} , ai costi di percorso, \underline{C} , ed i flussi di arco, \underline{f} , ai costi di arco \underline{c} . Esse rappresentano i modelli di assegnazione nel caso di reti non congestionate (costi sugli archi indipendenti dai flussi e, pertanto, costanti).

Per le reti congestionate, invece, il costo su un arco dipende dal flusso sull'arco stesso; formalmente si può scrivere:

$$\underline{c} = \underline{c}(f)$$

Si viene, pertanto, a creare una dipendenza circolare tra costi e flussi: i flussi sulla rete dipendono dai costi ed i costi, a loro volta, dipendono dai flussi (il flusso influenza se stesso). Questo problema è noto in letteratura scientifica come *problema di punto fisso*.

Il problema che si pone è quello di trovare un vettore dei flussi, detto vettore dei flussi di equilibrio, \underline{f}^* o \underline{F}^* , che sia consistente con i corrispondenti costi, \underline{c} o \underline{C} :

$$\underline{F}^* = \underline{P}(\underline{C}(\underline{F}^*))\underline{d}$$

$$\underline{f}^* = \underline{A}\underline{P}(\underline{A}^T \underline{c}(\underline{f}^*))\underline{d}$$

Le metodologie di risoluzione, algoritmi risolutivi, sono numerose e sono differenti a seconda delle ipotesi alla base del modello di scelta del percorso.

2.7 Algoritmi risolutivi del problema dell'assegnazione

Rispetto alle reti congestionate si possono fare ipotesi sulle dimensioni di scelta elastiche rispetto alla congestione. In particolare, si possono distinguere modelli a *domanda rigida* e modelli a *domanda elastica*. Nel primo caso si assume che la scelta del percorso è l'unica dimensione elastica alle variazioni dei costi dovuti alla congestione, nel secondo caso si assume che la domanda sia elastica su alcune dimensioni di scelta superiori, quali la scelta del modo e/o della destinazione.

In base a queste considerazioni, l'algoritmo di assegnazione scelto per lo studio in questione è il *DUE*, che sarà illustrato in seguito all'algoritmo *ToN* (*Tutto o Niente*), che è necessario per l'avvio di molti algoritmi tra cui il *DUE* stesso. Per completezza si tratteranno brevemente anche gli algoritmi risolutivi *SNL* e *SUE*. Infine, sarà illustrato brevemente l'algoritmo per il

calcolo degli *ipercammini minimi*, utile per l'assegnazione nel caso di trasporto pubblico.

2.7.1 Assegnazione *ToN* (*Tutto o Niente*)

Tra i diversi modelli comportamentali che possono essere usati per calcolare le probabilità di scelta del percorso, il più elementare è il modello di utilità deterministica; esso può essere visto come un caso particolare di un modello di utilità casuale nel quale la varianza dei residui ε_k è assunta pari a 0:

$$C^k = C_k$$

Con l'assegnazione tutto o niente, per ciascuna coppia origine destinazione, si computa l'itinerario di minimo costo, dopo aver pesato il grafo ipotizzando che sugli archi le velocità di percorrenza rimangano costanti e non influenzate dalla presenza di flusso veicolare. Identificato dunque l'itinerario di minimo costo, si assegna allo stesso tutta la domanda corrispondente alla coppia OD.

2.7.2 Assegnazione *DUE* (*Deterministic User Equilibrium*)

L'obiettivo dell'assegnazione deterministica è la determinazione del valore di flusso veicolare su ciascun arco del grafo tenendo conto, a differenza del tutto o niente, della congestione presente sull'arco.

In particolare, ciò che si deve risolvere è il *problema di punto fisso* su citato, e per far ciò si può utilizzare l'algoritmo di Frank-Wolfe, di seguito schematicamente descritto:

step 1: si pone il contatore $k=1$. Si avvia l'algoritmo con una assegnazione AoN della matrice OD al grafo ipotizzando il

grafo non congestionato. Si ottiene un valore di flusso su ciascun arco ovvero il vettore f^{k-1} ;

step 2: tramite le funzioni di costo si ottiene per ciascun arco del grafo il valore corrispondente di costo ovvero il vettore $c(f^{k-1})$;

step 3: si effettua una assegnazione AoN della matrice OD al grafo ipotizzando su ciascun arco un costo pari a quello determinato nello step 2. Si ottiene un valore di flusso per ciascun arco del grafo, ovvero il vettore y (vettore dei flussi di appoggio);

step 4: *stop test* sugli archi più significativi che identificano l'insieme A , ove il valore di flusso supera un valore soglia minimo (ad es. 100 veic/h) si effettua *stop test*:

se per ogni arco $a \in A$, $\frac{|y_a - f_a^{k-1}|}{f_a^{k-1}} \leq \varepsilon$ allora stop,

altrimenti $f_a^k = f_a^{k-1} * (1 - \mu) + \mu * y_a$. Il valore di μ , compreso tra 0 ed 1, è determinato in modo tale da minimizzare la seguente funzione

$$\sum_a c_a [(1 - \mu) * f_a^{k-1} + \mu * y_a].$$

Determinato dunque il vettore f_a^k , si pone il contatore $k=k+1$ e si torna allo step 2 fino a quando non sia verificato su tutti gli archi significativi lo stop test, ovvero, così come previsto dai software specialistici, quando si raggiunge un limite di iterazioni prefissate.

2.7.3 Assegnazione *SNL* (*Stochastic Network Loading*)

Nell'assegnazione *AoN* e nella *DUE* si ipotizza che l'utente riesca a determinare perfettamente il costo di percorrenza di ciascun arco. In realtà, come avviene nella scelta modale, l'utente percepisce il costo di percorrenza di ciascun arco in maniera difforme rispetto al valore deterministico assunto dall'analista, secondo la relazione vista precedentemente: $C^k = C_k + \varepsilon_k$ (ad inizio paragrafo). Per tener conto, dunque, dell'aleatorietà con cui l'utente percepisce il costo di percorrenza di ciascun arco, viene implementata l'assegnazione stocastica (*SNL*) in cui si effettua una simulazione di Montecarlo sul grafo.

In pratica, una volta determinato un costo di percorrenza su ciascun arco del grafo, viene effettuata una perturbazione dei singoli costi secondo una distribuzione probabilistica normale. A questo punto si effettua una assegnazione *AoN* della matrice OD al grafo, determinando un quindi un valore di flusso veicolare su ciascun arco. Queste perturbazioni vengono effettuate m volte fino a determinare il flusso veicolare su ciascun arco secondo la formula seguente:

$$f_a = \frac{\sum_{i=1}^m f_i}{m}$$

2.7.4 Assegnazione *SUE* (*Stochastic User Equilibrium*)

Con l'assegnazione *SNL* si tiene conto dell'aleatorietà con cui l'utente percepisce il costo di percorrenza di ciascun arco ma non si tiene conto dell'eventuale influenza che la congestione veicolare esercita sulla scelta effettuata dall'utenza. Per tener conto di entrambi i fattori, occorre implementare un'assegnazione *SUE* di seguito descritta:

- step 1: si pone il contatore $k=1$. Si avvia l'algoritmo con una assegnazione *DUE* della matrice OD al grafo. Si ottiene un valore di flusso su ciascun arco ovvero il vettore \underline{f}^{k-1} ;
- step 2: tramite le funzioni di costo si ottiene per ciascun arco del grafo il valore corrispondente di costo ovvero il vettore $\underline{c}(\underline{f}^{k-1})$;
- step 3: si effettua una assegnazione *SNL* della matrice OD al grafo ipotizzando su ciascun arco un costo pari a quello determinato nello step 2. Si ottiene un valore di flusso per ciascun arco del grafo, ovvero il vettore \underline{y} (vettore dei flussi di appoggio);
- step 4: *stop test* sugli archi più significativi che identificano l'insieme A , ove il valore di flusso supera un valore soglia minimo (ad es. 100 veic/h) si effettua lo *stop test*:

se per ogni arco $a \in A$, $\frac{|y_a - f_a^{k-1}|}{f_a^{k-1}} \leq \varepsilon$ allora stop,

altrimenti $f_a^k = f_a^{k-1} * (1 - \mu) + \mu * y_a$. Il valore di μ , compreso tra 0 ed 1, è determinato tramite la seguente

formula $\mu = \frac{1}{k}$.

Determinato dunque il vettore \underline{f}_a^k , si pone il contatore $k=k+1$ e si torna allo step 2 fino a quando non sia verificato su tutti gli archi significativi lo stop test, ovvero, così come previsto dai software specialistici, quando si raggiunge un limite di iterazioni prefissate.

2.7.5 *L'ipercammino di minimo costo*

I modelli di scelta del percorso, nell'ambito dei sistemi di trasporto collettivo, sono usualmente tutti di tipo comportamentale.

Si può distinguere il caso in cui la scelta sia effettuata interamente prima di iniziare lo spostamento (*scelta preventiva*), da quello in cui la scelta del percorso avvenga in due fasi e sia completamente definita solo durante lo spostamento a seguito di adattamenti alle circostanze non prevedibili prima di intraprendere lo spostamento incontrate durante lo spostamento stesso (*scelta mista preventiva/adattiva*). Il primo caso è di solito assunto per la scelta del percorso per sistemi che offrono un servizio di trasporto continuo ovvero un servizio di trasporto discontinuo con frequenze sufficientemente basse ed elevata regolarità per il quale si può assumere che l'utente conosca l'offerta e scelga la corsa prima di iniziare lo spostamento. Il comportamento misto preventivo/adattivo è invece di solito considerato per sistemi che offrono un servizio di trasporto discontinuo (di linea) con frequenza di servizio elevata e/o bassa regolarità quali i servizi di autobus urbani.

In questo paragrafo sono descritte le ipotesi comportamentali ed i modelli di scelta del percorso utilizzati nel caso di servizi di trasporto discontinui (comportamento misto adattivo-preventivo).

Come per tutti i modelli comportamentali la specificazione completa di un modello di scelta del percorso si articola in tre fasi:

- la definizione delle alternative di scelta;
- l'individuazione dell'insieme delle possibili alternative (insieme di scelta) e
- la definizione del modello di scelta fra le alternative possibili che, a sua volta, implica la definizione degli attributi e della utilità sistematica delle alternative oltre alla forma funzionale del modello di scelta.

In una rete di servizi di trasporto collettivo a frequenza elevata, le alternative di scelta non possono essere ottenute per analogia con il caso dei servizi continui in quanto non è realistico assumere che l'utente consideri come alternative soltanto i singoli percorsi sulla rete rappresentativa dei servizi per linee. Se così fosse un utente potrebbe considerare come alternative differenti i percorsi individuati da ciascuna delle linee che effettuano servizio fra una stessa coppia di fermate anche nel caso che vi siano più linee perfettamente equivalenti. Ad esempio un utente che si sposti sulla rete di figura 2.7 e scelga il percorso passante per B, D, G e la linea 7 che vi appartiene, una volta arrivato alla fermata D dovrebbe rifiutare un veicolo della linea 8 che passi prima di uno della linea 7 (pur essendo questa equivalente), perché i due percorsi apparterrebbero a due alternative di scelta diverse.

Per superare queste limitazioni bisogna prevedere la possibilità che le alternative di scelta considerate da un utente prima di iniziare lo spostamento comprendano più linee "equivalenti".

L'ipotesi di partenza per la definizione delle alternative di scelta è che l'utente che intraprende uno spostamento in un sistema di trasporto collettivo ad elevata frequenza, non possiede all'inizio dello spostamento tutte le informazioni necessarie per poter decidere completamente il suo spostamento. Ad esempio non è in grado di prevedere con esattezza il suo istante di arrivo alle varie fermate e/o l'effettivo orario di passaggio dei veicoli delle diverse linee che effettuano servizio a ciascuna fermata. In queste condizioni l'utente non sceglie un predeterminato percorso ma piuttosto una *strategia di viaggio* che gli consente di ottenere il costo medio dello spostamento che egli giudica minore.

Si configurano dunque due tipologie di comportamento di scelta: comportamento di scelta preventivo e adattivo.

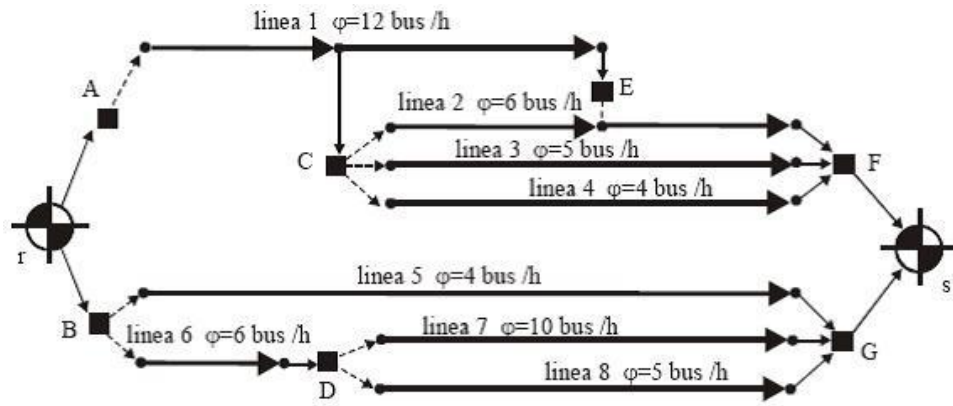


Figura 2.7 – Esempio di una rete di linee di trasporto collettivo

Il *comportamento di scelta preventivo* è quello che l'utente adotta prima di iniziare il viaggio confrontando le possibili strategie alternative e scegliendone una sulla base delle caratteristiche, o attributi, attesi.

Il *comportamento di scelta adattivo* è quello che l'utente segue durante il viaggio adattandosi, come si è detto, ad eventi casuali o non prevedibili. Il tipo di comportamento di scelta adattivo e l'insieme delle alternative a cui si applica definiscono una strategia di viaggio.

Se si ipotizza che l'arrivo degli utenti e dei veicoli alle fermate siano completamente casuali e che i passaggi delle varie linee appartenenti a L_i sia equidistanziato nel tempo, la probabilità di salire sulla linea l appartenente all'insieme delle linee attrattive alla fermata i , L_i , può essere espressa con:

$$Pr[l/i, L_i] = \varphi_l / \sum_{n \in L_i} \varphi_n$$

dove φ_l rappresenta la frequenza (numero di passaggi/unità di tempo) della linea l .

Sotto le ipotesi di comportamento adattivo descritte, una strategia di viaggio, può essere rappresentata sul grafo della rete dei servizi di trasporto collettivo come un sottografo detto *ipercammino*. I percorsi sono definiti *ipercammini semplici*. Strategie che includono scelte adattive ad una o più fermate possono essere rappresentate come l'unione di più ipercammini semplici che, per quanto detto in precedenza, devono essere tali che solo da

nodi fermata (o nodi di diversione) possono uscire più archi. Tali sottografi prendono il nome di *ipercammini composti*.

Ad ogni nodo di diversione i di un ipercammino h quindi corrisponderà un insieme L_{ih} di linee attrattive appartenenti all'ipercammino considerato. Agli archi di salita $l=(i,j)$ che collegano il nodo di diversione i con i nodi j delle linee che appartengono ad L_{ih} è possibile associare una *probabilità di diversione*, $\eta_{l,h}$, ovvero la probabilità di utilizzare la linea corrispondente al nodo j all'interno dell'ipercammino h , per gli eventi casuali che determinano la scelta adattiva:

$$\eta_{l,h} = p[l=(i,j)/i, L_{ih}] = \varphi_l / \sum_{n \in L_{ih}} \varphi_n \quad \text{se } l \in h, l \text{ arco di salita}$$

$$= 0 \quad \text{altrimenti}$$

Convenzionalmente si assegna una probabilità di diversione uguale a uno agli archi non di salita appartenenti all'ipercammino e una probabilità nulla agli archi non appartenenti all'ipercammino:

$$\eta_{l,h} = 1 \quad \text{se } l \in h \text{ e non è di salita}$$

$$\eta_{l,h} = 0 \quad \text{se } l \notin h$$

Sulla base delle probabilità di diversione $\eta_{l,h}$ è possibile calcolare la probabilità q_{kh} di seguire il percorso k all'interno dell'ipercammino h , la probabilità di seguire un certo percorso k all'interno dell'ipercammino h è pari al prodotto delle probabilità di diversione per tutti gli archi l che appartengono al percorso k , ovvero:

$$q_{kh} = \prod_{l \in k} \eta_{l,h}$$

da cui risulta:

$$q_{kh} = 0 \quad \text{se } k \notin h$$

Tale probabilità vale ovviamente uno se il percorso k coincide con l'ipercammino (semplice) h .

È inoltre possibile calcolare le probabilità b_{lh} di attraversare un singolo arco l dell'ipercammino h come la somma delle probabilità di seguire uno dei percorsi k appartenenti all'ipercammino h e che comprendono l'arco l :

$$b_{l,h} = \sum_{k:l \in k} q_{kh} = \sum_k a_{lk} q_{kh}$$

da cui risulta:

$$b_{lh} = 0 \quad \text{se } l \notin h$$

dove a_{lk} è il generico elemento della matrice di incidenza archi percorsi che vale uno se l'arco l appartiene al percorso k e zero altrimenti.

In definitiva l'utente che sceglie una certa strategia (ovvero un ipercammino che la rappresenta) non conosce in generale prima di iniziare lo spostamento quale percorso e quindi quali linee e quali archi utilizzerà, in quanto questo dipende da eventi aleatori quali la successione di arrivi dei veicoli alle fermate.

Una volta definite le alternative di scelta (strategie o ipercammini), è possibile trattare il problema dell'insieme di tali alternative (insieme di scelta) che l'utente prende in considerazione. La *definizione dell'insieme dei percorsi ammissibili*, ovvero delle alternative di scelta, è particolarmente rilevante per la dimensione di scelta del percorso dove la complessità topologica della rete può dar luogo a decine, o centinaia di percorsi che collegano una coppia O-D. L'insieme dei percorsi ammissibili I_{odm} che collegano la coppia di centroidi (o,d) sulla rete del modo m , andrebbe definito secondo un modello comportamentale che rappresenti la percezione degli utenti fornendo la probabilità di ciascun percorso di appartenere all'insieme delle alternative percepite da un generico utente di categoria i . Nella prassi, tuttavia, si ricorre ad approcci euristici che possono essere classificati in due tipologie.

L'*approccio esaustivo* considera ammissibili tutte le strategie (ovvero gli ipercammini che le rappresentano) esistenti sulla rete in esame.

L'*approccio selettivo* considera ammissibili solo gli ipercammini fra quelli topologicamente ammissibili sulla base del soddisfacimento di alcune regole euristiche.

In generale, può dirsi che l'*approccio esaustivo* è tipicamente associato ad una enumerazione implicita degli ipercammini. l'approccio selettivo di solito prevede la *enumerazione esplicita di percorsi* fra ciascuna coppia O-D.

Nelle applicazioni l'approccio prevalentemente utilizzato è quello esaustivo con enumerazione implicita, data la complessità di calcolo connessa alla enumerazione esplicita degli ipercammini.

Specificare il modello di scelta fra le alternative richiede, come detto, la definizione degli attributi e della forma funzionale del modello di utilità aleatoria. Anche nel caso di reti di servizi discontinui si assume che per ciascun ipercammino h , appartenente all'insieme I_{odm} degli ipercammini che collegano la coppia (o,d) sulla rete del modo (o dei modi) collettivo m , l'utilità percepita dell'ipercammino U_h abbia una media (utilità sistematica) V_h negativa pari al costo medio G_h :

$$U_h = V_h + \varepsilon_h = -G_h + \varepsilon_h \quad \forall h \in I_{odm}$$

Il costo medio dell'ipercammino G_h può essere espresso come la somma di una parte additiva G_h^{ADD} e di una non additiva G_h^{NA} che in questo caso, a differenza dei costi di percorso è sempre presente:

$$G_h = G_h^{ADD} + G_h^{NA}$$

Il costo additivo G_h^{ADD} è la media pesata dei costi generalizzati (tempi) di attraversamento degli archi non di attesa appartenenti all'ipercammino, quali tempo a bordo, di salita, di discesa e tempo a piedi:

$$G_h^{ADD} = \beta_b T_{bh} + \beta_s T_{sh} + \beta_d T_{dh} + \beta_p T_p$$

dove i β sono i rispettivi coefficienti.

Il costo non additivo è esprimibile come somma dei costi (tempi) di attesa W_h media pesata dei costi w_{lh} associati agli archi di attesa, nonché degli eventuali ulteriori costi non additivi ovvero non associabili a singoli archi N_h :

$$G_h^{NA} = \beta_w W_h + \beta_N N_h$$

dove β_w e β_N sono i coefficienti di reciproca sostituzione fra le diverse voci di costo non additivo.

Il costo (tempo) medio di attesa W_h connesso all'ipercammino h può essere calcolato a partire dai tempi di attesa w_{lh} associati a ciascun arco di attesa che possono essere espressi come:

$$w_{lh} = \begin{cases} \theta / \sum_{n \in L_{lh}} \varphi_{in} & \text{se } l \text{ è arco di diversione} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

dove i è il nodo di diversione da cui parte l'arco l , L_{lh} l'insieme delle linee attrattive appartenenti all'ipercammino h , n il generico arco di diversione che esce da i ovvero la generica linea nell'ipercammino h e θ è un parametro che assume valori compresi nell'intervallo (0,5-1) in funzione della ipotesi sulla legge degli arrivi degli utenti e dei veicoli.

Il costo medio di attesa W_h associato all'ipercammino h si può esprimere come:

$$W_h = \sum_{l \in h} w_{lh}$$

da cui risulta immediatamente che il tempo di attesa w_{lh} dipende, per lo stesso arco di diversione l , dall'ipercammino a cui si fa riferimento e pertanto il tempo totale di attesa W_h non è ottenibile come combinazione lineare di costi di arco indipendenti dall'ipercammino;

Per quanto riguarda infine il modello di scelta fra le alternative (ipercammini) disponibili, questo può essere espresso in forma generale

come la probabilità $p_H[h]$ che l'ipercammino h sia quello di massima utilità percepita:

$$p_H[h] = p_r[-G_h + \varepsilon_h \geq -G_{h'} + \varepsilon_{h'}] \quad \forall h', h \in I_{odm}$$

Anche nel caso del modello di scelta degli ipercammini si possono seguire due approcci. Quello di utilità deterministica ($Var[\varepsilon_h]=0$) che assegna tutta la domanda all'ipercammino di minimo costo generalizzato e modelli di utilità casuale, tipicamente Logit e Probit.

Nel caso di reti di trasporto collettivo, l'uso di modelli di utilità casuale di tipo logit è poco accettabile nel caso di ipercammini che possono comprendere una gran quantità di linee in comune, poiché non è ammissibile l'ipotesi di indipendenza delle alternative irrilevanti che è alla base dei modelli logit.

Infine una volta calcolate le probabilità di scelta degli ipercammini è possibile ottenere quelle di utilizzare un determinato percorso k come:

$$p^i[k / odm] = \sum_h q_{kh} p_H[h]$$

Condizione necessaria e sufficiente affinché un ipercammino di destinazione s sia l'ipercammino di minimo costo, è che per ogni nodo i dell'ipercammino si abbia:

$$c_i \leq c_j + c_{ij} \quad \forall (i, j) \in X_{i+} \quad \text{se } i \notin B \quad (2.7.5-1)$$

$$c_i \leq \left(\sum_{j \in X'_{i+}} \varphi_{ij} c_j + 1 \right) / \sum_{j \in X'_{i+}} \varphi_{ij} \quad \forall (i, j) \in X_{i+} \quad \text{se } i \in B \quad (2.7.5-2)$$

dove c_i e c_j sono i costi necessari per raggiungere la destinazione s dai nodi i e j con l'ipercammino da loro uscente, c_{ij} è il costo costante dell'arco (i, j) e φ_{ij} è la frequenza associata all'arco di attesa/salita (i, j) ; B l'insieme dei nodi fermata, X_{i+} insieme dei nodi collegati al nodo i -esimo da archi uscenti dal nodo i -esimo ed entranti nel nodo j -esimo.

La (2.7.5-2) individua il costo medio di percorrenza dell'ipercammino corrente tra il nodo di diversione i e la destinazione, calcolato come somma del tempo medio di attesa, dovuto a tutte le linee inserite nell'ipercammino corrente, pari a:

$$1 / \sum_{j \in X'_{i+}} \phi_{ij} = 1 / \phi_i$$

(essendo ϕ_i la frequenza associata al nodo fermata i) e del tempo medio di percorrenza ottenuto come media pesata dei tempi di percorrenza dei vari percorsi dalla fermata i alla destinazione, in cui il peso è dato dalla frequenza delle linee relative ai singoli percorsi rispetto alla frequenza cumulata, dato da:

$$\sum_{j \in X'_{i+}} c_j \left(\phi_{ij} / \sum_{j \in X'_{i+}} \phi_{ij} \right)$$

Per procedere alla descrizione degli algoritmi è necessario introdurre la definizione di albero di ipercammini o *iperalbero*, inteso come *insieme di ipercammini tale che vi sia un solo ipercammino da ciascun nodo del grafo alla destinazione comune*.

Ad ogni iterazione viene esaminato un nodo j della rete e per tutti gli archi appartenenti alla stella in entrata si esamina l'appartenenza del primo nodo i all'insieme dei nodi fermata B .

Nel caso che i non appartenga a B , se l'arco (i,j) non soddisfa la (2.7.5-1) l'ipercammino sin qui seguito per raggiungere i viene sostituito con quello formato dall'ipercammino fino a j e dall'arco (i,j) ed il costo di i viene aggiornato ponendo:

$$c_i = c_j + c_{ij}$$

Nel caso che i appartenga a B si distinguono due casi:

- i è stato raggiunto per la prima volta;

- i è già stato già raggiunto almeno una volta.

Se i viene raggiunto per la prima volta si pone la frequenza cumulata del nodo $\phi_i = \phi_{ij}$ e l'ipercammino costruito sino a j viene connesso con l'arco (i,j) , inserendo il nodo j in X'_{i+} ed aggiornando il costo secondo la:

$$c_i = c_j + \frac{1}{\phi_{ij}}$$

Nel caso in cui i sia stato già raggiunto si pone

$$\phi_i = \phi_i + \phi_{ij}$$

e si verifica se l'arco (i,j) non soddisfa la (2.7.5-2).

In questo caso l'ipercammino da i viene integrato tramite l'arco (i,j) con quello che si diparte da j , si pone $X'_{i+} = X^0_{i+}$ ed il costo viene aggiornato ponendo alla iterazione IT :

$$c_i^{(IT)} = c_i^{(IT-1)} + \left[c_j^* - c_i^{(IT-1)} \right] \frac{\phi_{ij}^*}{\phi_i^{(IT)}} \quad (2.7.5-3)$$

si sono introdotti per comodità gli apici (IT) e $(IT-1)$ per indicare l'iterazione (IT) corrente e la precedente $(IT-1)$ e si sono indicati con c_j^* ed ϕ_{ij}^* il costo e la frequenza da inserire all'iterazione IT .

In particolare si deve notare che se risulta $c_i^{(IT-1)} > c_j^*$ bisogna connettere, senza fare alcuna verifica, l'ipercammino che si diparte da j tramite l'arco (i,j) , giacché dalla (2.7.5-3) si può ricavare che essendo il termine tra parentesi minore di zero ne seguirà che sarà certamente

$$c_i^{(IT-1)} \leq c_i^{(IT-1)}$$

Alla fine di ogni iterazione i nodi per i quali è stato corretto il percorso ed il costo vengono posti in una lista, anche detta *serbatoio*, dalla quale viene estratto il nodo da esaminare nell'iterazione successiva.

Per quanto riguarda il calcolo dei flussi, nel quadro dei modelli deterministici di assegnazione su rete non congestionata nei quali la domanda viene assegnata solo ai percorsi di minimo costo (Tutto o Niente), è necessario scrivere dei passi di calcolo adeguati per il fatto che nell'ipercammino la domanda va distribuita sugli archi di diversione proporzionalmente alle frequenze delle linee cui si accede.

L'algoritmo di calcolo dei flussi parte dalla costruzione di una lista L con i nodi dell'iperalbero di destinazione s posizionati in ordine decrescente di costo; successivamente per ogni nodo j estratto dalla testa della lista viene calcolato il flusso che lo attraversa (dato dalla somma dei flussi presenti sugli archi entranti nel nodo j e dell'eventuale aliquota di domanda in origine dal nodo stesso e diretta alla destinazione s); tale flusso viene distribuito sugli archi uscenti dal nodo j tenendo conto che se il nodo j non è un nodo fermata ($j \notin B$) si ha un solo arco (per la definizione di ipercammino) e quindi va assegnato tutto il flusso, mentre se il nodo j è un nodo fermata ($j \in B$) occorre ripartire il flusso sugli archi uscenti da j in funzione delle frequenze delle linee. L'algoritmo si arresta quando sono stati estratti tutti i nodi della lista L , cioè $L = \emptyset$.

I passi dell'algoritmo di calcolo dei flussi, da utilizzare a valle dell'algoritmo di individuazione dell'ipercammino di minimo costo precedentemente descritto, sono riportati in figura 2.8.

step 0 [Inizializzazione]
 creazione lista L di nodi j ordinati in modo decrescente rispetto ai costi c_j

step 1 [analisi del primo nodo della lista]
 si estrae il nodo $j = L(1)$
 e si scalano di una posizione tutti gli elementi della lista.

step 1.1 [calcolo del flusso entrante nel nodo j]
 se $D(j) \neq 0$ allora $Z = D(j)$ altrimenti $Z = 0$
 $\forall i \in X_{j-}$
 $Z = Z + f_{ij}$

step 1.2 [calcolo del flusso sugli archi uscenti dal nodo j]
 $\forall k \in X_{j+}$
 se $j \in B$ allora $f_{jk} = f_{jk} + Z$
 se $j \in B$ allora
 $\forall k \in F(j)$

$$f_{jk} = f_{jk} + \frac{\varphi_{jk}}{\phi(j)} \cdot Z$$

step 2 [Test di arresto]
 Se la lista è vuota l'algoritmo si arresta, in caso contrario si torna allo **step 1**.

Figura 2.8 – Algoritmo di calcolo dei flussi sugli ipercammini di minimo costo

2.8 Metodi e modelli per la progettazione dell'offerta

Il sistema di modelli matematici descritto nei paragrafi precedenti mira a simulare il funzionamento di un sistema di trasporto di cui siano definiti il sistema di offerta (infrastrutture, servizi, prezzi) e il sistema di attività. L'utilizzazione tipica di questi modelli nella fase di progettazione consiste nell'ipotizzare alcuni interventi sull'offerta, simularne il funzionamento, verificarne la compatibilità tecnica ed infine valutarne la "convenienza". È

evidente che per individuare la soluzione al problema di progetto è necessario poter valutare le risposte del sistema (domanda, flussi, prestazioni) agli interventi da progettare e quindi disporre di un modello di simulazione del tipo descritto in precedenza. Il modello di simulazione, pertanto, costituisce una parte del modello di progettazione.

I modelli di simulazione rappresentano la capacità di prevedere le reazioni della domanda mentre i modelli di progettazione dell'offerta forniscono la strategia "vincente". I modelli di progettazione dell'offerta di solito semplificano il problema progettuale, in quanto considerano solo alcune variabili di progettazione e simulano le reazioni tra le variabili di progetto ed il sistema utilizzando modelli meno complessi; in generale *il problema di progettazione viene espresso come un problema di ottimizzazione di una funzione obiettivo sottoposta a vincoli*; la soluzione, o le soluzioni, di tale problema vengono poi utilizzate come punti di partenza per elaborazioni e verifiche successive.

Una classificazione dei diversi modelli di progettazione può esser fatta sulla base di alcuni elementi di seguito descritti e sintetizzati:

Variabili della progettazione (Tipologia di intervento)	Topologia della rete Prestazioni Prezzi e tariffe
Obiettivi della progettazione	Sociali Aziendali
Vincoli alla progettazione	Esterni Tecnici Di coerenza domanda/flussi/costi
Modello di simulazione	Elasticità della domanda Tipologia modello di assegnazione

Figura 2.9 – Fattori di classificazione dei modelli di progettazione dell'offerta

Entrando nel merito della classificazione è bene precisare che:

- *variabili di progettazione* (tipologia di intervento): gli interventi da progettare e le variabili di progetto che li identificano possono

essere distinti in interventi sulla topologia della rete dei collegamenti, interventi sulle prestazioni (ad es. le frequenze di linee del trasporto collettivo) ed interventi sui prezzi (ad esempio le tariffe di sosta);

- *obiettivi della progettazione*: la progettazione di un intervento può tendere ad ottimizzare (massimizzare o minimizzare) diverse funzioni obiettivo. I modelli proposti per la progettazione di solito considerano funzioni obiettivo sociali, connesse al costo generalizzato totale da minimizzare, oppure ai ricavi del traffico ovvero al margine operativo (ricavi al netto dei costi) da massimizzare. La funzione obiettivo può anche essere mista ovvero una combinazione di obiettivi sociali ed aziendali in analogia all'analisi benefici-costi;
- *vincoli alla progettazione*: il modello di progettazione dell'offerta può essere formulato in generale come un problema di ottimizzazione vincolata e, come spesso accade, alcuni obiettivi possono essere rappresentati sotto forma di vincoli. I vincoli che rispondono a questo scopo possono essere definiti esterni (ad es. vincoli sul budget), tecnici (relativi a condizioni di funzionalità tecnica del sistema) e di coerenza fra domanda, flussi, variabili di progetto e prestazioni del sistema;
- *ipotesi sul modello di simulazione*: I modelli di progettazione dell'offerta includono un sotto-modello (modello di simulazione) che simuli il comportamento del sistema domanda-offerta in corrispondenza dei valori assunti dalle variabili di progetto. Ad esempio il modello di progetto può essere a domanda rigida o a domanda elastica a secondo che consideri le matrici OD della domanda del singolo modo o dei diversi modi di trasporto oggetto della progettazione. Si può facilmente intuire che il modello di simulazione di solito più rilevante per i problemi di progetto è il modello di assegnazione (o interazione domanda-offerta) che può

essere basato su modelli di scelta del percorso deterministico o stocastico e considerare gli effetti della congestione o meno.

2.8.1 Formulazioni matematiche generali del problema di progettazione

Il modello di progettazione dell'offerta può in generale essere formulato come un modello di ottimizzazione vincolata nel quale si vuole ottimizzare (massimizzare o minimizzare) una funzione obiettivo $w(\cdot)$ che in generale dipende dalle variabili di progettazione, vettore \underline{x} , e dai flussi sugli archi della rete, vettore \underline{f} , sottoposta a vincoli di diverso tipo che, a loro volta, sono funzione dei parametri di progettazione e dei flussi. Come si è visto i flussi sugli archi risultanti dal modello di assegnazione possono essere espressi in funzione dei flussi di domanda OD (vettore \underline{d}), della topologia della rete (matrice d'incidenza archi-percorsi \underline{A}) e dalle probabilità di scelta del percorso (matrice \underline{P}). In generale sia la topologia della rete che la probabilità di scelta del percorso dipendono dalla configurazione dell'offerta, direttamente ovvero attraverso i costi e le funzioni di costo degli archi. I flussi di domanda, componenti del vettore di domanda, sono costanti se il modello assume domanda rigida mentre dipendono dalle prestazioni dell'offerta, e quindi dal vettore delle variabili di progetto, se si assume che la domanda sia elastica. In definitiva il modello di progettazione dell'offerta può essere formulato in modo generale come:

$$\underline{x}^* = \arg \max_x (\min) w(\underline{x}, \underline{f}^*) \quad (2.8.1-1)$$

sotto i vincoli:

$$\underline{f}^* = \underline{A}(\underline{x}) \underline{P}[\underline{x}, \underline{C}(\underline{f}^*, \underline{x})] \underline{d} [\underline{C}(\underline{f}^*, \underline{x})] \quad (2.8.1-2)$$

$$\underline{x}, \underline{f}^* \in E \quad (2.8.1-3)$$

$$\underline{x}, \underline{f}^* \in T \quad (2.8.1-4)$$

dove l'equazione (2) rappresenta il vincolo di coerenza fra offerta, prestazioni, domanda e flussi; l'equazione (3) individua l'insieme dei parametri di offerta che soddisfano i vincoli esterni e la (4) esprime il sistema dei vincoli tecnici.

Inoltre le notazioni $\underline{A}(\underline{x})$ e $\underline{P}[\underline{x}, \underline{C}]$ indicano che nel caso di variabili di progetto che influenzano la topologia della rete sia la matrice d'incidenza archi-percorsi che i percorsi alternativi e quindi la matrice delle probabilità di scelta del percorso dipendono dal valore delle variabili di progetto.

Per quanto riguarda la funzione obiettivo questa può assumere diverse forme in relazione all'ottica sotto la quale si progettano gli interventi. Le funzioni obiettivo sociali, in assenza di costi non additivi di percorso, possono esprimersi come:

$$w_1(\underline{x}, \underline{f}) = \sum_l c_l(\underline{x}, \underline{f}) f_l \quad (2.8.1-5)$$

Più raramente si adotta come funzione obiettivo il valore della soddisfazione totale sulla rete:

$$w_1(\underline{x}, \underline{f}) = \sum_{od} d_{od} s_{od} (-\underline{A}^T(\underline{x}) \underline{c}(\underline{x}, \underline{f}))$$

Le funzioni obiettivo aziendali possono riguardare il costo totale di investimento o di manutenzione:

$$w_2(\underline{x}) = \sum_j b_j(x_j) x_j \quad (2.8.1-6)$$

dove b_j rappresenta il costo unitario connesso a ciascuna variabile di progetto.

Un altro tipo di funzione obiettivo aziendale riguarda i ricavi del traffico che, a secondo che i prezzi di progetto siano relativi ai singoli archi, p_l , ovvero alle relazioni OD, p_{od} , assume una delle due forme:

$$w_2(\underline{p}, \underline{f}) = \sum_l p_l f_l$$

$$w_2(\underline{p}, \underline{d}) = \sum_{od} p_{od} d_{od}$$

Nel caso di ottimizzazione “multiobiettivo” si pone come funzione obiettivo una misura della utilità o del costo complessivi di solito espresso come una combinazione lineare di due o più delle funzioni descritte in precedenza; ad esempio, il costo complessivo per l’utenza e per le aziende è di solito ottenuto sommando le funzioni (2.8.1-5) e (2.8.1-6) con dei coefficienti che rappresentano il “peso” relativo dei diversi obiettivi.

Un ultimo aspetto generale riguarda gli algoritmi risolutivi dei modelli di progettazione. I modelli di progettazione dell’offerta possono essere specificati in modi diversi, si tratta in generale di modelli non lineari a vincoli non lineari. Per queste ragioni si fa ricorso prevalentemente ad algoritmi approssimati che in molti casi hanno fornito risultati soddisfacenti.

2.8.2 Esempio di modello di progettazione dei prezzi

I modelli di progettazione dei prezzi di un sistema di trasporto possono essere applicati a contesti e con finalità molto diversi. I prezzi, generalmente rappresentati come variabili continue p_l , possono essere relativi ai diversi elementi dell’offerta di trasporto: pedaggi stradali, tariffe di sosta, tariffe aeree o ferroviarie, ecc. La specificazione delle variabili di progetto \underline{p} dipenderà dalla “struttura tariffaria” ipotizzata, ovvero da come si pensa di applicare il prezzo. Se si ipotizzano prezzi costanti di accesso al sistema, le componenti p_l del vettore possono essere associate agli archi della rete rappresentativi delle barriere o delle strutture di sosta; se, viceversa, il

prezzo è proporzionale alla distanza percorsa, il parametro di prezzo p_l potrà essere associato a ciascun arco corrispondente ad un tratto di lunghezza finita.

Anche le finalità della progettazione possono essere molto diverse. Se l'obiettivo del prezzo è sostanzialmente quello di migliorare l'efficienza del sistema di trasporto, ad esempio riducendo il costo generalizzato complessivo del sistema e/o il livello complessivo d'inquinamento, il prezzo ottimale viene detto prezzo di efficienza. Un esempio tipico di progettazione dei prezzi di efficienza è rappresentato dal *road pricing*, o dal *parking pricing*, più in generale dall'applicazione di un prezzo d'uso delle infrastrutture viarie finalizzato alla minimizzazione del costo totale non rinnovabile, tipicamente il tempo totale di viaggio $\sum_l t_l(f_l)f_l$. Il problema di progettazione dei prezzi di efficienza di una rete stradale a domanda rigida può essere quindi formalizzato come:

$$\underline{p}^* = \arg \min_p \sum_l t_l(\underline{f}^*) \underline{f}^* \quad (2.8.2-1)$$

sottoposto ai vincoli:

$$\underline{p} \geq 0$$

$$\underline{f}^* = \underline{AP}(\underline{C}(\underline{f}^*, \underline{p})) \underline{d}$$

Nel caso particolare in cui il modello di assegnazione è un *DUE* e le funzioni di costo sono separabili, una soluzione \underline{p}^* del problema (2.8.2-1) può essere ottenuta risolvendo il problema di ottimo ad unico livello in cui si descrive l'assegnazione di ottimo di sistema.

Utilizzando questo approccio il prezzo ottimo p_l^* può essere calcolato come:

$$p_l^* = c'(f_l^*) f_l^* \quad \forall l$$

Una ulteriore riflessione riguarda l'ipotesi, implicita nella formulazione (2.8.2-1) che la domanda \underline{d} sia rigida. Diversi risultati sembrano indicare che le riduzioni più significative della congestione possono essere ottenute per effetto di variazioni della domanda, ad esempio a causa di una diversa ripartizione modale e/o distribuzione fra le fasce orarie. Per affrontare il problema in questo modo è necessario quindi considerare la domanda OD per il modo auto d_{od}^A come elastica; ad esempio si può assumere che la domanda sia elastica rispetto alla ripartizione modale $d_{od}^A(s_{od}^A(\underline{p}^A, \underline{f}^A), s_{od}^B)$, dove A e B rappresentano due modi (ad esempio auto e trasporto collettivo), s_{od}^A e s_{od}^B sono i rispettivi valori dei costi generalizzati relativi alla coppia od o delle soddisfazioni rispetto alla scelta del percorso, che dipendono dai costi di percorso \underline{C}^A e \underline{C}^B . Si è inoltre ipotizzato che solo i costi relativi alla rete stradale siano dipendenti dal vettore dei flussi \underline{f}^A oltre che dai prezzi di progetto \underline{p}^A . In questo caso può essere significativo imporre degli ulteriori vincoli al problema (2.8.2-1), ad esempio richiedere che i flussi sugli archi stradali risultino inferiori di una aliquota prefissata ai corrispondenti valori di capacità.

Il modello di progettazione dei prezzi assume una forma completamente diversa se l'obiettivo è quello aziendale di massimizzare i ricavi del traffico, ovvero l'utile netto (ricavi meno costi). In questo caso, assumendo che nel mercato vi sia un unico operatore che può variare i prezzi e che la struttura tariffaria sia tale da associare un prezzo a singoli archi della rete, il problema può essere formulato come:

$$\underline{p}^* = \arg \max_p \sum_l p_l f^*$$

soggetto a:

$$\underline{f}^* = \underline{AP}(\underline{C}^A(\underline{f}^*)) \underline{d}^A(\underline{C}^A(\underline{p}, \underline{f}^A), \underline{C}^B)$$

$$\underline{p} \geq 0$$

dove la domanda OD relativa alla modalità considerata viene di solito considerata elastica rispetto al prezzo per variazioni non marginali di questo e tutte le grandezze (flussi, costi, ecc.) oggetto di progettazione se non altrimenti specificato sono relative al modo A.

2.9 Conclusioni

Il capitolo è voluto essere un richiamo a quelle basi teoriche indispensabili per poter trattare il problema della modellazione di un sistema di trasporto e la progettazione di interventi di modifica dell'offerta di trasporto. Nel capitolo seguente, forti dello studio bibliografico di settore, dell'analisi di esperienze internazionali e delle indispensabili conoscenze teoriche che stanno alla base del problema, si vuole proporre un caso pratico di applicazione di *parking pricing* e di progettazione mirata e puntuale di potenziamento del trasporto pubblico locale.

CAPITOLO 3

APPLICAZIONE SUL CASO STUDIO DI PALERMO

3.1 Premessa

Sulla base dell'analisi metodologica condotta nel capitolo precedente si vuole adesso condurre un'applicazione sul contesto urbano della città di Palermo. Si seguiranno i passi già approfonditi per lo studio di un sistema di trasporto e si ipotizzeranno degli scenari progettuali valutando, tramite una funzione obiettivo, qual è la soluzione ottimale al problema di *parking pricing* proposto. Le fasi di studio si articoleranno pertanto in:

1. individuazione dell'area di studio;
2. suddivisione in zone dell'area di studio (zonizzazione);
3. definizione del modello di offerta del sistema di trasporto;
4. stima (tramite indagini o modelli) della domanda di trasporto che interessa l'area di studio (matrici OD ovvero Origine/Destinazione);
5. simulazione dell'interazione domanda/offerta (calcolo dei flussi di traffico sulle diverse componenti del sistema);
6. progettazione dell'offerta.

Analizziamo in dettaglio le varie fasi nei paragrafi seguenti.

3.2 Area di studio e zonizzazione nel contesto urbano della città di Palermo

La città di Palermo si affaccia sulla costa nord-occidentale della Sicilia, si estende su 158,88 kmq e conta 656.829 abitanti (Istat, 2012). I dati Istat del 2001 sugli spostamenti sistematici mostrano che circa 323.000 individui ogni mattina per motivi di studio e di lavoro raggiungono Palermo, contro gli 8.500 che dalla città si spostano verso gli altri comuni. Il dato degli ingressi a Palermo va poi sommato agli spostamenti generati all'interno della città stessa, che sono circa 284.000, per un totale di persone che si muovono all'interno dell'area cittadina pari a 607.000. Considerando che i residenti a Palermo sono all'incirca 650.000, i dati prima mostrati fanno emergere che si ha un numero di persone che si muovono pari circa a quello dei residenti. Inoltre, se per i ragionamenti prima esposti si considera che la maggior parte di questi si sposta con mezzo privato e che il *coefficiente medio di occupazione del veicolo* è di 1,3 (PUT, 2009), allora si ha un enorme numero di veicoli che ogni giorno invadono la rete stradale palermitana rendendola invivibile.

Si è scelto di assumere come elementi base per la zonizzazione le *zone di traffico* individuate per il *PUT (Piano Urbano del Traffico)* del 2009, si individuano così nel territorio comunale 200 *zone* che altro non sono che aggregazioni di particelle censuarie Istat.

Col fine di voler individuare l'area da sottoporre a tariffazione dei parcheggi, pensata come l'area che attrae il maggior volume di traffico veicolare privato, si valuta l'attrattività delle singole zone. Si sommano, pertanto, tutti i flussi di spostamenti di auto che hanno in comune la medesima zona di destinazione; l'operazione equivale alla somma degli elementi della matrice O/D auto presenti su una colonna della matrice stessa; si può quindi definire flusso attratto dalla zona d come:

$$d_d = \sum_o d_{od}$$

essendo d_{od} il generico elemento della matrice (flusso di spostamenti espresso in veic/h).

Prendendo in considerazione la matrice *OD* del *PUT* del 2009, relativa al modo di trasporto *auto*, si rappresenta l'attrattività delle zone con il seguente grafico che permette di visualizzare le aree che vedono le maggiori criticità del traffico veicolare privato in ingresso nelle ore di punta del giorno ferial medio invernale.

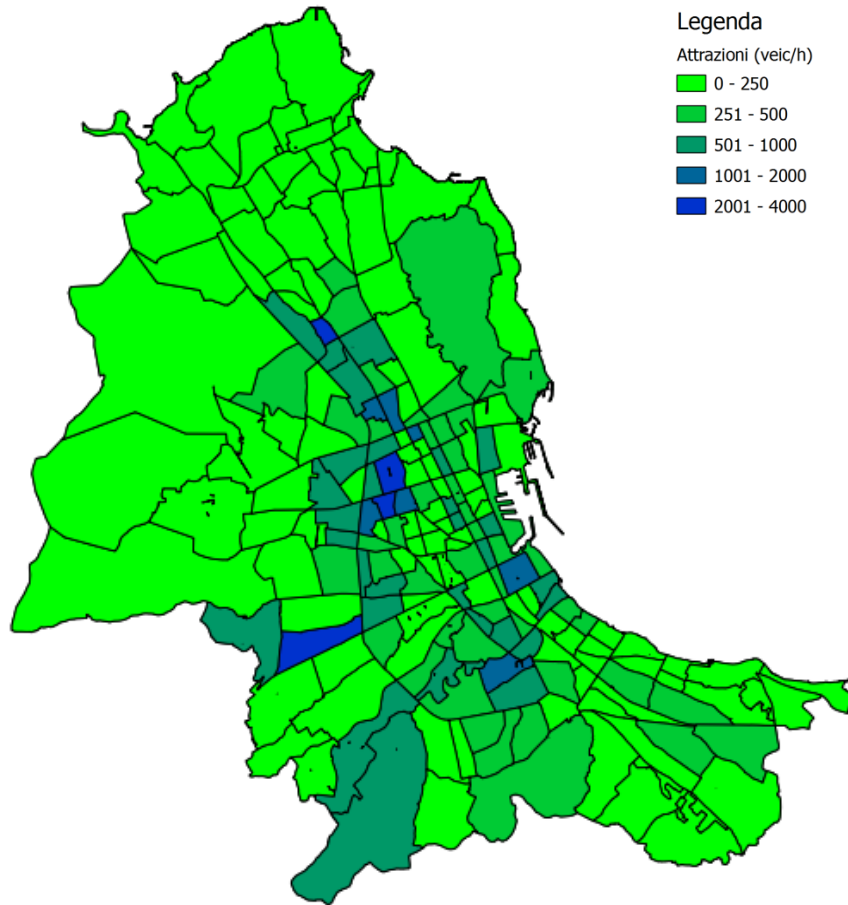


Figura 3.1 – Domanda attratta nell'ora di punta

Dall'analisi della figura suddetta emerge che il maggior numero di auto è attratto da zone al cui interno ricadono poli universitari, scuole, ospedali, uffici, aree con forte vocazione commerciale. Per il lavoro in esame si è

preferito selezionare il centro storico includendo quelle aree adiacenti ad esso e con attività tali da richiamare un numero di utenza significativa. Inoltre tale operazione di selezione ha anche lo scopo di preservare il patrimonio architettonico della città e di realizzare una più netta separazione tra le due componenti di traffico veicolare e pedonale.

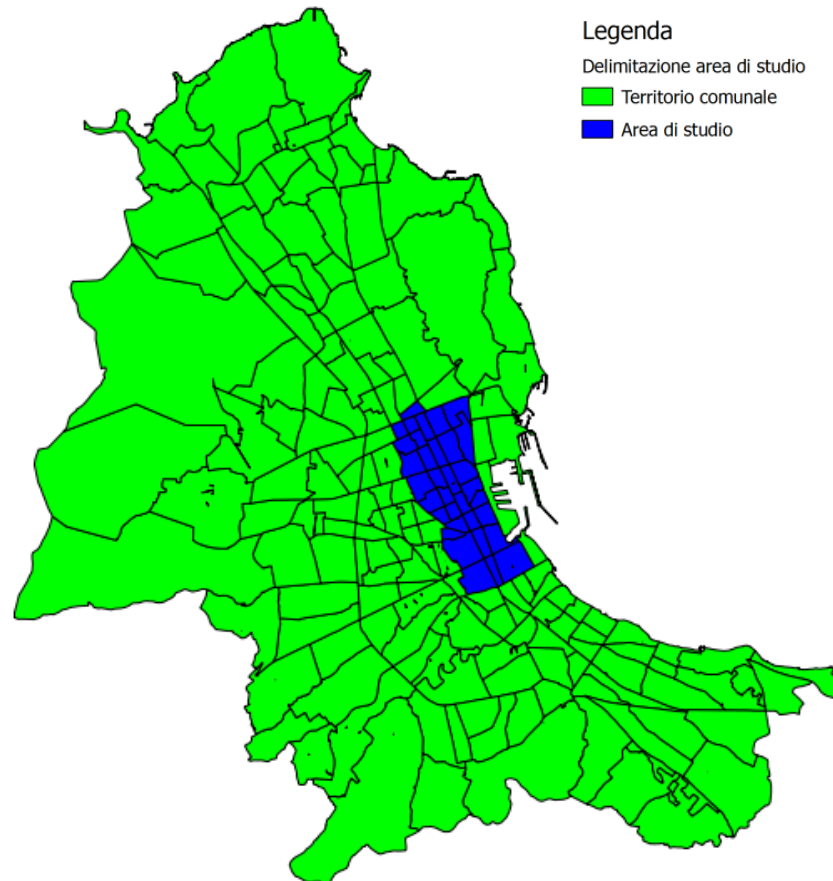


Figura 3.2 – Delimitazione area di studio

L'area di studio individuata è quella che si vorrà assoggettare alla nuova modalità di limitazione e controllo degli accessi attraverso l'adozione di un opportuno schema *parking pricing*. Quest'area oltre a inglobare quelle che il PUT 2009 chiama *ZTL1* e *ZTL2*, mantenendo lo stesso perimetro, si spinge nella zona nord-ovest della città fino a Piazza Vittorio Veneto.

3.3 Definizione dell'offerta di trasporto

3.3.1 Il grafo stradale

La costruzione del grafo stradale consiste nella modellazione della rete viaria esistente del trasporto privato. L'offerta di trasporto privato a cui si è fatto riferimento è quella definita nel lavoro di tesi *"La progettazione di interventi per una mobilità sostenibile in ambito urbano"* di A. Lo Burgio (2013). Si riportano di seguito le fasi salienti della modellazione del grafo ed il risultato raggiunto.

Si è adoperato il software open source *QuantumGis*, sistema informativo geografico a codice aperto, noto come *QGis*. Tale software viene utilizzato per creare, visualizzare, interrogare e analizzare dati geospaziali, i quali riportano informazioni inerenti la posizione geografica di un oggetto, che spesso implica l'uso di coordinate geografiche, quali valori di latitudine e longitudine.

I dati che più interessano, ai fini del presente studio, sono quelli vettoriali, che altro non sono che un modo per descrivere una posizione utilizzando un insieme di coordinate. Questo consente di costruire grafi georiferiti, usando come base un'immagine *raster* dell'area che si vuole studiare. Avendo come guida il *raster* georiferito dell'area in cui si vuole costruire il grafo, si comincia con il disegnare gli archi della rete e a compilare il relativo database, in cui per ogni *record* (arco) si devono valorizzare i campi relativi al nodo origine, destinazione, lunghezza (che viene calcolata in automatico dal software), capacità, velocità a vuoto V_0 e la tipologia di arco (di rete, connettore, parcheggio, TPL) a ognuno dei quali corrisponde una diversa funzione di costo.

La modellazione della reale rete viaria ha poi subito modifiche internamente all'area di studio variando i sensi di circolazione, definendo alcune aree pedonali, implementando la logica del sistema di circolazione a stanze. Più in generale si sono quindi messi in pratica i criteri di buona

progettazione di cui si è discusso nel capitolo 1. Il risultato è visibile nella figura seguente.

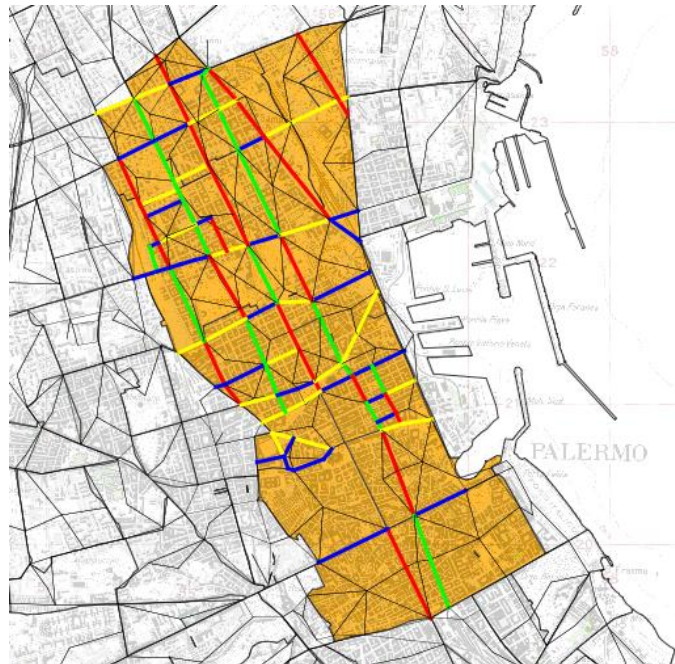


Figura 3.3 – Grafo nell’area di studio con circolazione a stanze

Nella Figura 3.3 vengono indicati i sensi di circolazione per ogni asse interno all’area, che per semplicità sono stati indicati con i punti cardinali. Da notare che gli assi di via Ruggero Settimo, via Maqueda, via Cavour e Piazza Giuseppe Verdi, vengono inibiti al traffico privato, creando una grande area ciclo-pedonale che disconnette la città nella quattro direzioni.

si è assegnata la funzione di costo *BPR* (*Bureau of Public Roads*) agli archi di rete e la *PLN* (*polinomiale*) a tutti gli altri, anche se in quest’ultimo caso per ogni tipo di arco il costo associato assume un significato diverso per le varie tipologie.

Per quanto riguarda il sistema della sosta, sia gli stalli su strada sia i parcheggi, sono stati modellati attraverso un arco, con costo costante e pari alla tariffa oraria associata, collegato da un lato con un arco reale della rete stradale, attraverso un *arco di accesso al parcheggio*, e dall’altro con il

centroide della zona in cui ricade l'area di sosta, con un arco *fittizio*¹.

Per i parcheggi scambiatori è stata adottata la stessa modellazione, soltanto che, avendo ipotizzato la presenza di *shuttle bus* che collegano il parcheggio con le destinazioni, l'arco parcheggio è collegato ai *centroidi* delle zone attraverso degli archi il cui costo è somma delle seguenti aliquote: tempo di attesa, di salita, di percorrenza, di discesa e tempo a piedi per raggiungere il centroide dalla fermata.

3.3.2 L'offerta di sosta

Ad oggi l'offerta di parcheggio sulle strade di Palermo non riesce a far fronte alla domanda derivante dai flussi di auto entranti. All'interno dell'area urbana si possono contare 24 parcheggi per un totale di circa 7.200 posti auto.

<i>N.</i>	<i>Parcheggio</i>	<i>Posti auto</i>	<i>Classifica</i>	<i>Tipologia</i>
1	Mondello - Mongibello/Pindaro	225	operativo	a raso
2	Sferracavallo - via Schillaci	154	interscambio	a raso
3	Mondello - via Saline	65	sostitutivo	a raso
4	Mondello - via Galatea	291	operativo	a raso
5	Via Fattori	147	operativo	a raso
6	Viale Francia	864	interscambio	a raso
7	Via Belgio	329	operativo	a raso
8	Piazzale De Gasperi Nord	52	sostitutivo	a raso
9	Piazzale De Gasperi Sud	57	sostitutivo	a raso
10	Piazzale Giotto	1655	interscambio	a raso
11	Stazione Notarbartolo - Via Di Maria	138	interscambio	a raso
12	Piazza Unità d'Italia	44	sostitutivo	a raso
13	Via Rutelli Ovest	60	sostitutivo	a raso
14	Piazzale Ungheria	173	sostitutivo	a raso

¹ AxE non riconosce il tipo di arco in automatico, quindi, quest'arco fittizio deve essere di costo molto elevato, per evitare l'attraversamento del nodo centroide da parte di flusso diretto verso altre zone, e assunto costante per tutti i collegamenti, in modo da sottrarlo facilmente nel calcolo dei tempi per ogni coppia OD.

15	Via degli Emiri	690	interscambio	a raso
16	Via Serradifalco	84	operativo	a raso
17	Via Zisa	30	operativo	a raso
18	Piazza Vittorio Emanuele Orlando	700	sostitutivo	sotterraneo
19	Via Spinuzza	110	sostitutivo	a raso
20	Via Libero Grassi	205	operativo	a raso
21	Via Paulsen	118	operativo	a raso
22	Università - Via E. Basile	928	interscambio	a raso
23	Via dell'Antilope	49	operativo	a raso
24	Via dell'Antilope - Baglio Bonta	38	operativo	a raso

Tabella 3.1 – Parcheggi esistenti

È possibile inquadrare tipologicamente, dal punto di vista funzionale, tutti i parcheggi in tre grandi categorie:

- *parcheggi di interscambio* (o scambiatori), aventi la funzione di trasferire il traffico di penetrazione diretto verso le centralità urbane su linee di forza del sistema di trasporto pubblico;
- *parcheggi sostitutivi*, finalizzati a soddisfare la domanda di parcheggio che deriva dai provvedimenti di allontanamento della sosta dalla viabilità principale urbana, finalizzati a favorire la fluidità del traffico veicolare e in particolar modo dei mezzi del trasporto collettivo;
- *parcheggi operativi* (ossia di relazione), a sostegno della domanda di sosta generata da poli di attrazione, quali le attrezzature e i servizi pubblici.

Oltre alla capacità dei parcheggi è stata valutata l'offerta di sosta su strada. A tale scopo si rivela di ausilio lo studio di tesi di laurea *“Politiche di pricing per una mobilità sostenibile in ambito urbano - Il caso studio di Palermo”* di Rodonò C. (2013), nella quale si è proceduto ad una ricognizione degli stalli presenti all'interno della rete viaria ricadente all'interno dell'area di studio; i cui valori sono riportati nella Tabella 3.2.

<i>Zona</i>	<i>N° stalli</i>	<i>Residenti</i>	<i>Auto residenti</i>	<i>Sosta diurna residenti</i>	<i>Stalli liberi</i>
1	540	2234	670	402	138
2	360	2949	885	531	0
3	1301	4939	1482	889	412
4	431	1437	431	259	172
5	1202	6194	1858	1115	87
6	1050	4887	1466	880	170
7	590	1374	412	247	343
8	620	1137	341	205	415
9	730	918	275	165	565
10	991	4123	1237	742	249
21	730	2204	661	397	333
22	660	1288	386	232	428
23	700	1682	505	303	397
24	730	2231	669	402	328
38	1250	5570	1671	1003	247
39	790	1688	506	304	486
40	530	1342	403	242	288
41	1050	4539	1362	817	233
55	860	3195	959	575	285
56	390	870	261	157	233
57	690	1960	588	353	337
77	415	4721	1416	850	0
78	259	3194	958	575	0
79	256	3164	949	570	0
80	473	6391	1917	1150	0
81	516	1058	317	190	326
108	259	2101	630	378	0
109	158	2295	689	413	0
110	243	3088	926	556	0
111	402	6171	1851	1111	0
112	472	3478	1043	626	0
131	166	1630	489	293	0
132	170	744	223	152	18
133	246	3923	1177	706	0

Tabella 3.2 – Stalli su strada nell'area di studio

Attraverso rilevamenti a campione, all'interno dell'area di studio, si è stimato un coefficiente medio di possesso dell'auto pari a 0,3, ottenuto come rapporto tra il numero di auto in sosta durante le ore notturne e la

popolazione residente. Questo ha consentito di calcolare, per ogni *zona di traffico*, il numero di automobili possedute dai residenti. A questo punto basta fare un bilancio tra il numero di auto e stalli disponibili per far emergere che in molte zone il numero di veicoli è di gran lunga superiore all'offerta di sosta. In questo caso si intuisce che c'è la presenza di un certo numero di autorimesse e box privati, che permettono di soddisfare la domanda di sosta o almeno di ricovero notturno. Si è passati, quindi, a calcolare la domanda di sosta diurna dei residenti per ogni zona, che si è stimata mediamente pari al 60% delle auto possedute dai residenti (dato che proviene da osservazioni a campione nelle zone durante l'ora di punta mattutina). In questo modo è possibile calcolare l'offerta di stalli disponibili per ogni zona, la cui sintesi è riportata nella seguente Tabella 3.2. In via cautelativa, nelle zone dove la domanda di sosta diurna dei residenti è superiore al numero di stalli, si è considerata un'offerta di stalli nulla, anche se in realtà parte dei residenti potrebbero possedere posti auto in box o autorimesse e, quindi, una percentuale di stalli su strada verrebbe comunque liberata.

Nell'area in esame, su 20.182 stalli presenti soltanto 6.462 sono disponibili ad accogliere i veicoli che provengono dall'esterno. Quest'ultimi vengono stimati, secondo la matrice OD_{auto} del PUT 2009 in 13.136, quindi, più del doppio rispetto alla disponibilità di stalli liberi su strada. All'offerta vanno però sommati gli stalli presenti nelle aree di sosta all'interno delle singole zone, che sono altri 1.225, come può evincersi dalla Tabella 3.3.

<i>Area di sosta</i>	<i>N° stalli</i>	<i>Zone servite</i>
Piazza Vittorio Emanuele Orlando	700	6-7
Piazzale Ungheria	173	8
Via Spinuzza	110	1
Stazione Notarbartolo - Via Di Maria	138	55
Piazza Unità d'Italia	44	109
Via Rutelli Ovest	60	79

Tabella 3.3 – Aree di sosta interne all'area di studio

Anche gli stalli delle aree di sosta non sono sufficienti a soddisfare la domanda di parcheggio, per questo motivo si è deciso di sfruttare meglio i parcheggi di interscambio che si trovano a margine dell'area di studio. Per aumentare l'attrattività di questi parcheggi, oggi in totale disuso, si ipotizza di collegarli, con le zone di traffico interne all'area di studio, attraverso degli *shuttle bus* dedicati.

<i>Area di sosta</i>	<i>N° stalli</i>	<i>Zone servite</i>
Piazzale Giotto	1655	77-78-79-80-81-108-109-110-111-112-113-133-131-132-55-56-40-57
Via degli Emiri	690	7-8-9-10-21-22-23-24
Porto	150	55-56-57-40-38-39-41
Università - Via E. Basile	928	3-4-5-6-1-2
Via Belgio	329	131-108-109-110-132-133

Tabella 3.4 – Parcheggi d'interscambio collegati all'area di studio

I parcheggi d'interscambio individuati hanno una disponibilità di stalli pari a 3.752 che sommati a quelli ricadenti all'interno dell'area di studio danno un totale di 11.439. Confrontando questo dato con gli utenti che nell'ora di punta vogliono raggiungere e parcheggiare nell'area di studio, ci si accorge che ancora una volta l'offerta di sosta non riesce a soddisfare la domanda. Quindi, nel breve periodo, è necessario agire in modo da riuscire a spostare un'aliquota di domanda verso altre modalità di trasporto.

3.3.3 Il TPL (*trasporto pubblico locale*)

Anche se con qualche alternativa di spostamento su ferro, vedi la linea di metropolitana leggera e le linee di tram a breve in funzione, il sistema di trasporto pubblico su cui la città di Palermo a oggi può contare, e sul quale è possibile intervenire nel breve periodo, è quello su gomma, gestito dall'azienda a capitale pubblico *AMAT* (*Azienda Municipalizzata Auto Trasporti*). Il servizio è prevalentemente in sede promiscua, solo in alcuni

tratti sono presenti delle corsie riservate. L'estensione della rete urbana è di 332 Km, se si aggiungono le zone extraurbane si arriva a 340 Km, ed è articolata in 90 linee. Le corsie preferenziali hanno un'estensione di 33,82 Km (il 10,2% della rete totale), la percorrenza chilometrica annua programmata è di 23 milioni di Km e il numero annuo di passeggeri trasportati è circa di 80 milioni. Le coincidenze tra le molteplici linee sono favorite dalla possibilità di interscambiare in 7 diversi nodi della rete:

1. Stazione Centrale;
2. Parcheggio Basile (ex Indipendenza);
3. Emiri;
4. Giotto/Lennon;
5. De Gasperi/Stadio;
6. Politeama/Croci;
7. Sturzo.

La frequenza e la velocità commerciale variano linea per linea. La frequenza media registrata è di circa 25 minuti con una velocità commerciale media di 10 Km/h, valori questi che non permettono al trasporto pubblico di essere competitivo con il trasporto privato. È, quindi, prioritaria una profonda ristrutturazione delle linee.

In questo studio non si è trattato il grafo del trasporto pubblico con conseguente metodologia di assegnazione della domanda con il metodo degli ipercammini di minimo costo. Ci si è limitati ad una rivalutazione dell'offerta di trasporto pubblico agendo su quelle direttrici di spostamento che, per effetto della tassazione della sosta hanno visto un sostanziale incremento della domanda di mobilità. Pertanto, per tenere conto dell'elasticità della domanda nella fase di ripartizione modale, si è utilizzata la matrice dei tempi relativa al TPL, ricavata dalle elaborazioni per il PUT 2009, e agendo sulla frequenza delle linee di interesse si è rafforzato il TPL. Si illustra la procedura seguita.

Nell'ambito del modello di scelta modale, che caratterizzeremo nei paragrafi seguenti, l'attributo di utilità che indica il tempo di percorrenza su bus, T_{TRAVEL} comprende le aliquote relative al tempo a piedi, tempo di attesa e tempo di percorrenza, che indicheremo rispettivamente t_{piedi} , t_{attesa} e $t_{perc.}$.

Essendo $d_{bus,0}$ la domanda di spostamento su bus da scenario reale e $d_{bus,P}$ la domanda da scenario *pricing*, la variazione espressa in pass/h varrà:

$$d_{bus,P} - d_{bus,0}$$

Pertanto essendo la velocità commerciale media del bus in ambito urbano $v_{m,bus}$ si determina il tempo di percorrenza in minuti:

$$t_{perc.} = 60 \frac{dist}{v_{m,bus}}$$

e da esso i tempi a piedi e di attesa stimati rispettivamente come

$$t_{piedi} = \frac{1}{4}(t_{bus,0} - t_{perc.}) \quad t_{attesa} = \frac{3}{4}(t_{bus,0} - t_{perc.})$$

Inoltre potendo considerare per sistemi di trasporto collettivo non regolari:

$$t_{attesa} = 2 \frac{i}{2} \Rightarrow t_{attesa} = i$$

dove "i" è l'intertempo. Si può quindi calcolare la frequenza espressa in bus/h:

$$f = \frac{60}{i}$$

Volendo potenziare il TPL, nello scenario progettuale la nuova frequenza sarà pari alla frequenza dello scenario attuale maggiorata in funzione del numero di nuovi bus, n^{new_bus} , aggiunti in servizio sulla linea:

$$f' = f * \frac{n'}{n} \quad \text{dove } n' = n + n^{new_bus}$$

A potenziamento effettuato, esprimeremo il nuovo intertempo come:

$$i' = \frac{60}{f'}$$

ed infine i nuovi tempi bus, nello scenario "*P*" *pricing* saranno:

$$T_{TRAVEL,P} = t_{pedi} + i' + t_{perc.}$$

In definitiva aumentando la frequenza di mezzi su una tratta diminuirà l'intertempo, ovvero il tempo di attesa, e quindi anche il termine complessivo che indica lo spostamento col mezzo pubblico T_{TRAVEL} su bus.

Si è ritenuto congruo giustificare l'aumento del numero di mezzi pubblici in servizio su di una tratta di una unità quando, sulla medesima direttrice di spostamento, si registra, in seguito alla politica di tariffazione avviata, un incremento almeno pari a 30 pass./h, ovvero:

$$d_{bus,P} - d_{bus,0} \geq 30 \text{ pass.} / h$$

Nei paragrafi seguenti il potenziamento descritto del TPL sarà contestualizzato nell'ambito dell'intero processo progettuale. Il risultato sarà l'automatizzazione della progettazione del potenziamento TPL in funzione del trasferimento modale a favore dei mezzi pubblici.

3.3.4 Le alternative *car pooling* e *car sharing*

Abbiamo già parlato della politica del *car pooling* (auto di gruppo), finalizzata a ridurre i volumi di traffico privato nelle aree urbane aumentando l'efficienza nell'utilizzo dell'auto privata attraverso un aumento del coefficiente di occupazione dei veicoli. Nel presente studio il modello di scelta modale, che analizzeremo nel prossimo paragrafo, contempla il modo di spostamento *car pooling*. Questa modalità di trasporto, per sua natura, non può che essere trattata alla stregua del normale trasporto veicolare privato. La differenza con quest'ultimo modo di spostamento risiede nella diversità del coefficiente di occupazione dei veicoli. Indagini sperimentali

hanno condotto alla considerazione che mediamente questo coefficiente assume valore pari a 2 nell'ipotesi di condivisione dell'auto, contro il valore di 1,3 del classico spostamento su auto. Quest'assunzione comporta che gli utenti che sceglieranno tale modalità di spostamento vedranno dimezzati i costi monetari, quali il costo del carburante e del parcheggio. D'altronde è proprio questa la filosofia del *car pooling*, ridurre i costi, ma anche il numero di auto in circolazione, condividendo gli spostamenti e le spese annesse.

Abbiamo anche accennato a come la politica del *car sharing* (auto condivisa) consenta di impiegare la rete stradale con maggiore razionalità, mediante utilizzo in forma collettiva dei veicoli. A seguito di adesione ad una proposta di associazione, si può utilizzare su prenotazione un veicolo disponibile nel parcheggio più vicino al luogo della richiesta. A Palermo questo servizio, sempre a gestione *AMAT*, è disponibile. Il *car sharing* è un servizio di mobilità pubblica individuale, integrativo al trasporto pubblico e privato, intelligente, economico e rispettoso dell'ambiente. Il servizio è inteso come alternativa all'uso del veicolo privato e prevede la condivisione di un parco auto a basso impatto ambientale tra tutti i cittadini iscritti al Club CAR SHARING PALERMO, limitando l'utilizzo dell'auto al tempo strettamente necessario. Ciò consente, a ciascun socio, di conseguire un notevole risparmio economico personale e di contribuire alla riduzione dell'inquinamento atmosferico. Il funzionamento di questo servizio prevede una serie di semplici passi:

- *abbonamento*: al momento dell'abbonamento l'utente riceve tutte le istruzioni e la documentazione necessarie per fruire del servizio assieme alla smartcard. La smartcard è una scheda con microchip individuale dotata di codice segreto PIN, necessario per ritirare la vettura e restituirla;
- *prenotazione*: per prenotare gratuitamente basta entrare nel sito www.carsharingpalermo.it nella sezione "come iscriversi" e seguire

le istruzioni, oppure chiamare il Call center chiedendo il veicolo che si preferisce e l'area di sosta che interessa;

- *ritiro vettura*: all'ora stabilita si troverà nell'area di sosta indicata il veicolo prenotato;
- *utilizzo auto*: l'accesso alla vettura è semplice e comodo. Per aprire le portiere è sufficiente avvicinare la smart card al parabrezza ove è sistemato il lettore. A bordo si trovano le chiavi. Digitando il PIN sull'apposita tastiera si potrà avviare l'auto dando il via al periodo di utilizzo. Sul display di bordo si potrà leggere, in tempo reale, l'esatto calcolo dei chilometri percorsi e del tempo di utilizzo;
- *rilascio auto*: alla fine dell'utilizzo, si dovrà riportare il veicolo nell'area di sosta in cui è stato prelevato, digitare il pulsante di rilascio sul display, uscire e chiudere le portiere ripassando la card sul lettore. Ad oggi su alcuni parcheggi è previsto il servizio *one-way*.

Sono svariati i motivi che possono indurre il cittadino, soprattutto il residente nelle zone centrali della città, a scegliere il servizio di *car sharing* per le esigenze di mobilità:

- si può scegliere un'auto diversa in funzione delle necessità del momento;
- si può scegliere tra i tanti parcheggi disponibili;
- si può usufruire del servizio 24 ore su 24, tutti i giorni dell'anno;
- si può circolare in presenza di limitazioni del traffico (es. targhe alterne);
- si possono percorrere le corsie preferenziali;
- si può viaggiare anche fuori città;
- si può parcheggiare gratuitamente nelle zone blu;
- si può parcheggiare gratuitamente nei parcheggi Car Sharing;
- il costo del servizio comprende il carburante e le polizze assicurative (infortuni conducente e kasko, con franchigia);

- il costo del servizio è fatturato mensilmente ed è scaricabile per chi ha partita IVA.

Il costo del servizio si compone di due parti:

1. quota fissa di abbonamento annuale;
2. tariffa proporzionale all'effettivo utilizzo dell'auto: funzione della durata della corsa e dei chilometri percorsi.

Per il caso studio in esame si considererà esclusivamente la seconda componente di costo, definendo in tal modo il costo “vivo” dello spostamento dell'utente per il suo viaggio sistematico con motivo lavoro/studio. Analogamente infatti, nel caso del trasporto veicolare privato non saranno considerati voci di costo quali le spese di ammortamento per l'acquisto del mezzo, ma soltanto i costi “vivi”: carburante e parcheggio.

La tariffa di utilizzo prevede un costo medio orario di 2,20 €/h ed un costo medio chilometrico (nel caso in esame fino a 100 km) di 0,435 €/km. Con questi due parametri si definirà il costo di spostamento con la modalità *car sharing* sul grafo della rete stradale urbana.

3.4 La domanda di spostamento

Ultimata la modellazione dell'offerta di trasporto occorre conoscere la domanda di spostamento e quindi, nel paragrafo successivo, l'interazione tra le due.

3.4.1 La matrice OD

La matrice OD adoperata nel presente studio è quella oggetto di calibrazione in occasione della redazione del PUT 2009. Essa esprime gli spostamenti sistematici, per motivi studio/lavoro, effettuati nell'ora di punta 7,30-8,30 del giorno feriale medio invernale.

In occasione della redazione del PUT 2009 è stata condotta una campagna di rilevamenti di traffico, effettuati in punti di importanza strategica; in particolare, è stata monitorata l'intera circonvallazione di viale Regione Siciliana rilevando sia i flussi di attraversamento longitudinale che trasversale. All'interno della città, invece, sono stati rilevati i flussi in ben 103 sezioni. A questa si è aggiunto il flusso dei motoveicoli, ricavando così la matrice in veicoli equivalenti. Si è infine tenuto conto del traffico di veicoli pesanti, indicando il flusso aggiuntivo associato ad ogni singolo arco, anch'esso stimato sulla base della campagna di rilevamenti effettuata sui mezzi pesanti, e in particolare si è calcolato un valore di veicoli equivalenti pari a 2 autoveicoli per mezzo pesante in ambito urbano e 2,5 autoveicoli per mezzo pesante lungo la circonvallazione.

Dall'analisi di questi dati emerge un quadro macroscopico della mobilità nella città di Palermo. In particolare, ogni giorno il sistema urbano di Palermo è interessato da un flusso di autovetture pari a 898.352, di cui 69.104 nell'ora di punta. Di quest'ultimi, 56.910 effettuano spostamenti interni alla città e rappresentano, dunque, la mobilità interna dei residenti; i restanti 12.194 sono relativi agli spostamenti di scambio e di attraversamento del centro urbano.

Per quanto concerne il trasporto pubblico urbano su gomma, questo è interessato da un volume di domanda pari a circa 19.230 durante l'ora di punta mattutina nell'ambito degli spostamenti interni al territorio comunale.

Infine, si è stimato che il numero medio di passeggeri a bordo delle auto, il cosiddetto *coefficiente di occupazione*, è pari a 1,3. Quindi, dalla matrice

OD_{auto} (veic/h) e dalla matrice OD_{bus} (pass/h) nell'ora di punta, relative al PUT 2009, si può calcolare la domanda totale (pass/h) che è pari a:

$$d_{od,tot} = 1,3 \cdot d_{od,car} + d_{od,bus}$$

A questo punto si hanno le tre matrici OD che consentono di descrivere la domanda di mobilità nell'area palermitana e, quindi, si può passare alla fase di progettazione.

3.4.2 Il modello di scelta modale

Definita la matrice OD che aggrega le varie componenti di traffico diventa essenziale trattare il modello di scelta modale, di cui al par. 2.5.1, che ci consentirà nuovamente di “splittarla” in più componenti in funzione degli interventi adoperati sul sistema di trasporto.

Il modello di scelta modale del tipo *Logit multinomiale* prende le proprie mosse con la determinazione, per ogni coppia OD, delle utilità sistematiche V_m associate al modo di trasporto m come combinazione lineare dei k attributi:

$$V_j = \sum_k \beta_k \cdot X_{kj}$$

dove X_{km} sono gli attributi e β_k i coefficienti degli attributi delle utilità che sono frutto di calibrazione.

Su questo tema, in un lavoro precedente (Catalano, Lo Casto, Migliore, 2008) è stato calibrato un modello *Logit multinomiale* per la città di Palermo, nel quale, si esprime quattro utilità sistematiche relative ad altrettanti modi di trasporto. La specificazione del modello è la seguente:

$$V_{CAR} = \beta_{T_{TRAVEL}} \cdot T_{TRAVEL} + \beta_{C_{TRAVEL}} \cdot C_{TRAVEL} + \beta_{T_{PARKING}} \cdot T_{PARKING} + \beta_{CAR} \cdot CAR$$

$$V_{CARPOOLING} = \beta_{T_{TRAVEL}} \cdot T_{TRAVEL} + \beta_{C_{TRAVEL}} \cdot C_{TRAVEL} + \beta_{T_{PARKING}} \cdot T_{PARKING}$$

$$V_{CARSHARING} = \beta_{T_{TRAVEL}} \cdot T_{TRAVEL} + \beta_{C_{TRAVEL}} \cdot C_{TRAVEL} + \beta_{T_{PARKING}} \cdot T_{PARKING} + \\ + \beta_{NCARS} \cdot NCARS + \beta_{CS} \cdot CS$$

$$V_{PUBLICTRANSPORT} = \beta_{T_{TRAVEL}} \cdot T_{TRAVEL} + \beta_{C_{TRAVEL}} \cdot C_{TRAVEL} + \beta_{PT} \cdot PT$$

dove gli attributi hanno il seguente significato:

- V_j : parte sistematica della funzione di utilità relativa all'alternativa j ;
- T_{TRAVEL} : tempo di spostamento espresso in min.;
- C_{TRAVEL} : costo di spostamento espresso in €;
- $T_{PARKING}$: tempo di effettuazione del parcheggio espresso in min.;
- CAR (1/0), CS (1/0), PT (1/0): attributi specifici d'alternativa;
- $NCARS$: per singola famiglia, esprime il numero di auto disponibili per ogni utente che sistematicamente si sposta per motivo studio/lavoro.

I termini $\beta_{T_{TRAVEL}}, \beta_{C_{TRAVEL}}, \beta_{T_{PARKING}}, \beta_{NCARS}, \beta_{CAR}, \beta_{CS}, \beta_{PT}$, definiti coefficienti di attributi di utilità, esprimono il peso che ha ognuno dei relativi attributi all'interno della funzione di utilità. Il loro segno matematico indica che l'attributo costituisce utilità (segno positivo) o viceversa disutilità (segno negativo) per la funzione V_j . Generalmente, ed è questo il caso, tali coefficienti hanno segno negativo dato che esprimono i costi di una determinata modalità di trasporto; costi monetari o costi intesi in termini di tempo. Infatti quella che genericamente è definita *utilità sistematica* V_j altro non è che una disutilità ovvero il *costo generalizzato del trasporto* C_j . Pertanto altra funzione che hanno i coefficienti β_k è quella di omogeneizzare dimensionalmente i vari attributi X_{kj} per poter esprimere V_j , altrimenti detto C_j , in un'unica unità dimensionale indicata con [util].

Nel lavoro citato (Catalano, Lo Casto, Migliore, 2008) per la stima dei parametri del modello è stato adoperato il software Nlogit 3.0 processando 3080 osservazioni di scelte modali da parte di utenti. Oggetto del processo di calibrazione è proprio la stima dei coefficienti β_k con il *metodo della massima verosimiglianza o ML* (dall'inglese *maximum likelihood*).

Analizziamo nel dettaglio il modello stimato ed adoperato nel presente studio. Per il trasporto privato su auto, il *car pooling* ed il *car sharing*, l'attributo del tempo di spostamento T_{TRAVEL} è la somma del tempo complessivamente speso per spostarsi dalla zona di origine a quella di destinazione, comprende quindi le varie fasi di spostamento a piedi ed a bordo del mezzo. Diversamente per il trasporto pubblico il tempo di spostamento comprende i seguenti elementi: il tempo a bordo del mezzo, il tempo di attesa alla fermata del bus ed i tempi di spostamento a piedi.

Per quanto concerne la variabile del costo di spostamento C_{TRAVEL} , nel caso del mezzo privato e del *car pooling*, è costituita dalle seguenti componenti: il costo determinato dal prodotto di costo chilometrico e distanza percorsa ed il costo del parcheggio. Queste due voci di costo inoltre, costi su distanze percorse e costi di parcheggio, vanno divisi per il *coefficiente medio di occupazione del veicolo*, pari a 1 per il trasporto privato ed a 2 per il *car pooling*, come già espresso, infatti, il valore mediato su tutta la città di Palermo di tale coefficiente è pari a 1,3.

Nel caso del *car sharing*, il costo di spostamento è articolato nella somma di un costo chilometrico ed un costo orario di utilizzo del mezzo (vedi paragrafo precedente):

$$\text{costo chilometrico} \times \text{distanza percorsa} + \text{costo orario}$$

Per il trasporto pubblico il costo di spostamento è stimato sulla base del costo di abbonamento mensile del biglietto del bus a Palermo.

La tabella seguente mostra il valore stimato dei coefficienti degli attributi, la loro significatività statistica, la misura del *goodness-of-fit* (la

bontà di adattamento del modello al campione osservato) ed i risultati del *t-test* sui parametri.

<i>Attributi</i>	<i>Coefficienti</i>	<i>Standard error</i>	<i>t-ratio</i>	<i>P[Z >z]</i>
<i>T_{TRAVEL} (min)</i>	-0,02605340	0,27924585E-02	-9,330	0,0000
<i>C_{TRAVEL} (€)</i>	-0,28923442	0,27332091E-01	-10,582	0,0000
<i>T_{PARKING} (min)</i>	-0,10766113	0,13312674E-01	-8,087	0,0000
<i>NCARS</i>	-2,60542611	0,21059922	-12,371	0,0000
<i>CAR (1/0)</i>	1,14893210	0,98749327E-01	11,635	0,0000
<i>CS (1/0)</i>	1,48328631	0,16045208	9,244	0,0000

Number of choice observations = 3080

Log likelihood function = - 3892,192

ρ^2 (constants only) = 0,04

Value of time (T_{travel}/C_{travel}): 5,40 €/h

Tabella 3.5 – Risultati del processo di stima del modello Logit multinomiale

Come si può notare la stima delle variabili introdotte nel modello ha elevata significatività statistica ed i coefficienti hanno tutti il segno appropriato.

Approfondimenti condotti in occasione della stima di tale modello di scelta modale hanno espresso come la domanda potenziale di spostamento con la modalità *CarSharing* crescerebbe coinvolgendo aliquote fino al 10% di utenti in ipotetici scenari caratterizzati dalle seguenti azioni di politica dei trasporti:

- aumento delle tariffe di sosta e chiusura del centro storico della città di Palermo al traffico dei veicoli altamente inquinanti ;
- sviluppo del sistema di trasporto pubblico locale in termini di frequenza e capacità riducendo i tempi di spostamento a bordo dei mezzi ed i tempi di attesa;
- la diffusione di aree di sosta riservate alle modalità *CarSharing* e *CarPooling*.

Questo aspetto permetterà di condurre interessanti considerazioni al termine delle simulazioni per l'applicazione in esame.

È quindi a questo punto possibile calcolare la probabilità che l'utente che si reca dall'origine o alla destinazione d per il motivo s scelga il modo di trasporto m :

$$p(m/ods) = \frac{e^{V_m}}{\sum_m e^{V_m}}$$

Espressione del modello di scelta modale di cui al sottoparagrafo 2.5.1. Esplicitando tale espressine per il caso in esame, si può scrivere:

$$\begin{aligned} p_{CAR} &= \frac{e^{V_{CAR}}}{e^{V_{CAR}} + e^{V_{CARPOOLING}} + e^{V_{CARSHARING}} + e^{V_{PUBLICTRANSPORT}}} \\ p_{CARPOOLING} &= \frac{e^{V_{CARPOOLING}}}{e^{V_{CAR}} + e^{V_{CARPOOLING}} + e^{V_{CARSHARING}} + e^{V_{PUBLICTRANSPORT}}} \\ p_{CARSHARING} &= \frac{e^{V_{CARSHARING}}}{e^{V_{CAR}} + e^{V_{CARPOOLING}} + e^{V_{CARSHARING}} + e^{V_{PUBLICTRANSPORT}}} \\ p_{PUBLICTRANSPORT} &= \frac{e^{V_{PUBLICTRANSPORT}}}{e^{V_{CAR}} + e^{V_{CARPOOLING}} + e^{V_{CARSHARING}} + e^{V_{PUBLICTRANSPORT}}} \end{aligned}$$

Infine è possibile calcolare il numero di utenti che utilizzano ogni singolo modo di trasporto in relazione alla domanda totale di spostamenti:

$$\begin{aligned} d_{CAR} &= d_{od,tot} \times p_{CAR} \\ d_{CARPOOLING} &= d_{od,tot} \times p_{CARPOOLING} \\ d_{CARSHARING} &= d_{od,tot} \times p_{CARSHARING} \\ d_{PUBLICTRANSPORT} &= d_{od,tot} \times p_{PUBLICTRANSPORT} \end{aligned}$$

dove ovviamente si deve verificare che:

$$\begin{aligned} d_{CAR} + d_{CARPOOLING} + d_{CARSHARING} + d_{PUBLICTRANSPORT} &= d_{od,tot} \\ p_{CAR} + p_{CARPOOLING} + p_{CARSHARING} + p_{PUBLICTRANSPORT} &= 1 \end{aligned}$$

Alla fine di questo processo, si otterranno le matrici OD per ciascun motivo, per le varie modalità di trasporto e per le varie fasce orarie.

Del modello su citato ci si avvarrà nei successivi *step* dell'applicazione.

3.5 L'interazione domanda offerta per l'applicazione

Con la simulazione dell'interazione domanda/offerta è possibile, a mezzo dei modelli di assegnazione calcolare i flussi sulla rete di trasporto, in funzione dei costi di percorso, note le caratteristiche della domanda di trasporto (matrici OD) e le caratteristiche dell'offerta di trasporto (grafo della rete). Tali modelli sono anche detti modelli di interazione domanda/offerta e sono tutti comportamentali (vedi par. 2.6).

Di seguito si analizzerà dapprima il software adoperato per le assegnazioni dei flussi di traffico sul grafo, quindi si analizzerà concretamente la procedura seguita per l'applicazione in esame.

3.5.1 Il software di assegnazione AxE

Analogamente a quanto effettuato nello studio di tesi *“La progettazione di interventi per una mobilità sostenibile in ambito urbano”* di A. Lo Burgio (2013), essendo il presente studio un ampliamento del suddetto, si è adoperato per l'implementazione della fase di assegnazione il software AxE; È d'obbligo pertanto una breve presentazione del programma, delle sue potenzialità e delle sue modalità operative.

Il software *AxE* (*Assegnazione per Esperti*) nasce dall'esigenza di poter disporre di un semplice strumento per facilitare le fasi di analisi e progettazione delle reti di trasporto. In particolare, consente di assegnare attraverso diversi algoritmi, la matrice OD al grafo. Il software, distribuito gratuitamente, è stato sviluppato dal Prof. Giorgio Salerno, docente presso il

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze, e dai suoi collaboratori. Esistono due versioni equivalenti del programma, una per la piattaforma *Windows* e una per *Macintosh*. Il linguaggio di programmazione utilizzato per lo sviluppo è l'*APL* (*A Programming Language*) nella versione *AplX* della *MicroApl*.

Il programma non è dotato di una propria interfaccia grafica ma, sia per il *data entry* sia per la visualizzazione dei risultati, viene utilizzato un qualsiasi foglio di calcolo (Calc, Excel, ecc.) e il meccanismo del *copia e incolla* sugli appunti del sistema.

Il software, come già anticipato, consente l'utilizzo di diversi algoritmi di assegnazione, quali:

- TN, assegnazione Tutto o Niente;
- TND, assegnazione Tutto o Niente dinamica;
- IPER, assegnazione al trasporto collettivo a frequenza;
- ALQ, assegnazione per aliquote, con e senza controllo di capacità;
- FW, assegnazione d'equilibrio;
- DIAL, assegnazione aleatoria.

L'esecuzione del programma è di tipo *batch*, ovvero si preparano i dati indipendentemente dal programma che poi viene lanciato in un secondo momento e l'elaborazione avviene senza interazioni con l'utente. Per l'immissione dei dati si può utilizzare qualsiasi foglio elettronico, con la sola accortezza di mantenere alcune regole di siglatura e di posizione dei dati, che garantiscono la corretta lettura da parte di AxE. Infatti, il programma inizialmente cercherà le cosiddette *parole chiave*, cioè quelle che iniziano con il simbolo *>*, che indicano il tipo di dato che da quel punto in poi leggerà, come:

- >ALGORITMO
- >GRAFO
- >F (flussi)
- >OD

Per ciascuna di esse AxE individuerà la zona del foglio in cui leggere quel tipo di dato, a partire dalla cella sottostante a quella della parola chiave e fino a incontrare in basso una riga vuota ed a destra una colonna vuota.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	AxE: Algoritmo FW (equilibrio deterministico)												
2	Adattamento da Sheffi, "Urban...", fig. 5.1, p. 114 e tab. 5.4 p. 120												
3	>ALGORITMO												
4	FW		0	50									
5													
6	>GRAFO												
7	1	3 BPR	10	2		0	0				0	54	
8	1	4 BPR	20	4		0	0						
9	1	5 BPR	25	3		0	0						
10	2	1 PLN	1			0	0						
11	3	2 PLN	0			0	0						
12	4	2 PLN	0			0	0						
13	5	2 PLN	0			0	0						
14													
15													

Figura 3.4 – Impostazione dati per AxE

Sotto la cella >ALGORITMO va specificato il tipo di algoritmo che si vuole utilizzare attraverso le sigle prima riportate. Nelle celle accanto alla sigla dell'algoritmo vanno riportati i parametri che si vogliono impostare; ad esempio, nel caso di un algoritmo all'equilibrio (FW) si deve riportare la precisione che si vuole ottenere e il numero massimo d'iterazioni. Infatti, l'algoritmo si arresta quando raggiunge la precisione fissata, ma se ciò non si dovrebbe verificare, l'arresto avviene una volta raggiunto il numero di iterazioni impostate.

Sotto la cella >GRAFO si comincia inserendo nelle prime due colonne rispettivamente il nodo iniziale e finale degli archi, seguono il tipo di funzione di costo associata all'arco e i parametri che la contraddistinguono. In particolare, per la funzione di costo *PLN* vanno inserite in ogni colonna i

coefficienti dei termini in ordine decrescente di grado, invece, nella funzione del *BPR* vanno inseriti due parametri: il *tempo a vuoto* dell'arco t_{a0} e la *capacità* dell'arco c_a .

Sotto la cella >F può essere inserito un flusso precaricato, che non viene sommato ai flussi finali, e nella colonna adiacente, inizialmente vuota, sono riportati i flussi a seguito dell'assegnazione.

Infine, sotto la cella >OD viene riportata la matrice OD, che può essere scritta anche in forma di lista inserendo la sigla >ODL.

Una volta preparati i dati, si procede nel selezionare la parte del foglio di calcolo che va dalla cella più in alto a sinistra (>ALGORITMO) fino alla cella più in basso a destra che consente di includere tutti i dati immessi. A questo punto, attraverso il comando *copia*, i dati verranno immessi negli appunti del sistema e da qui prelevati da AxE una volta avviato.

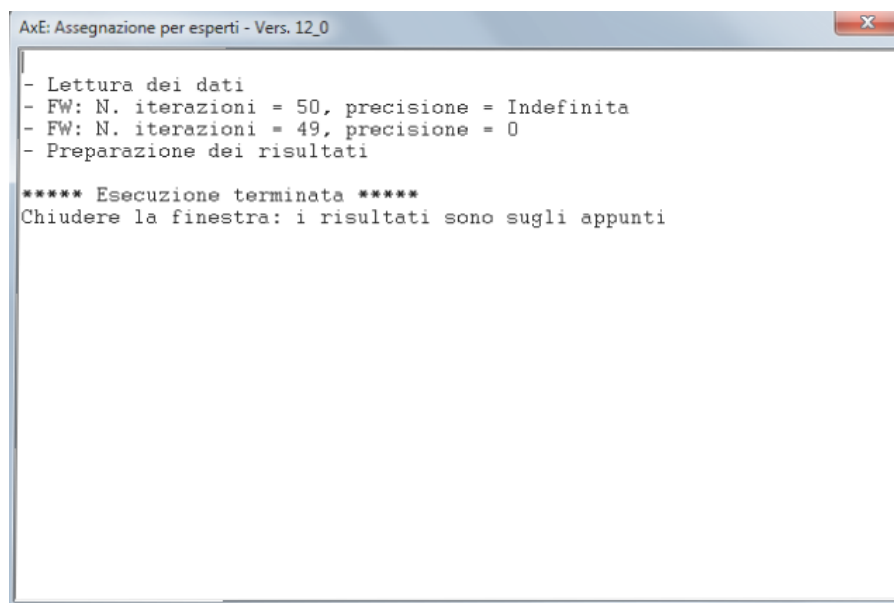


Figura 3.5 – Schermata di fine elaborazione di AxE

Una volta terminata la fase di assegnazione da parte del programma, i risultati vengono messi nuovamente negli appunti del sistema e, quindi, basta *incollarli* su un foglio di calcolo, nel quale verranno visualizzati con la

stessa impostazione con cui sono stati immessi. In questo caso, nella seconda colonna dei flussi risulteranno i valori dei flussi di ogni singolo arco a seguito dell'assegnazione effettuata.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	AxE: Algoritmo FW (equilibrio deterministico)												
2	Adattamento da Sheffi, "Urban...", fig. 5.1, p. 114 e tab. 5.4 p. 120												
3	>ALGORITMO												
4	FW	0	50										
5													
6	>GRAFO												
7	1	3 BPR	10	2	0	14					0	54	
8	1	4 BPR	20	4	0	23							
9	1	5 BPR	25	3	0	17							
10	2	1 PLN	1		0	0							
11	3	2 PLN	0		0	14							
12	4	2 PLN	0		0	23							
13	5	2 PLN	0		0	17							
14													
15													

Figura 3.6 – Output dati di AxE

AxE è a oggi ancora in fase di ulteriore sviluppo e ottimizzazione, infatti, per lo studio in questione è stata sviluppata una nuova *release* che, oltre alle funzioni già possedute nelle precedenti versioni, consente di avere la matrice dei tempi sugli archi per ogni iterazione e sui percorsi di minimo costo finali.

3.5.2 Gli scenari progettuali

Gli scenari progettuali altro non sono che i piani tariffari della sosta nell'area soggetta a progettazione. Si tratta di definire come assoggettare a tassazione le aree centrali della città, quali interventi porre a corredo per la fluidificazione del traffico veicolare ed il trasferimento della domanda sui mezzi pubblici. Ogni ipotesi di intervento attiva un processo di progettazione di tipo iterativo, che a mezzo di una procedura euristica

ripercorre circolarmente i “*suoi passi*” per poter convergere verso una soluzione esatta ottimale del problema.

Lo studio degli scenari progettuali dell'applicazione ha come *step* di partenza lo scenario reale. La valutazione di come muta il sistema dei trasporti ipotizzando l'applicazione dei diversi piani tariffari deve infatti necessariamente essere rapportata alla situazione iniziale. All'interno dell'area oggetto di studio, allo stato attuale, il sistema della sosta è regolato dalle zone blu, con tariffa variabile da zona in zona con una media di 1 euro. Inoltre, non sono presenti limitazione di accesso ai veicoli privati, né di tipo spaziali né temporali, e il sistema di trasporto pubblico locale su gomma ha le caratteristiche di esercizio descritte in precedenza.

L'applicazione del modello di scelta modale (vedi sottopar. 3.4.2) alla matrice *OD*, noti anche gli attributi di costo per ogni singola coppia *od*, ha permesso di valutare quanto la distribuzione modale degli spostamenti è nettamente a favore del mezzo privato. Gli split modali registrati in questo che definiamo *Scenario 0*, ovvero la situazione reale di partenza, sono i seguenti, valutati sia sull'intera città di Palermo che sull'area che sarà oggetto di progettazione tariffaria:

<i>Scenario 0</i>	<i>%Auto</i>	<i>%CarPooling</i>	<i>%CarSharing</i>	<i>%Bus</i>
Split modali Palermo	55,35	19,59	1,97	23,08
Split modali ZTL	35,89	16,16	0,97	46,99

Tabella 3.6 – Split modali nello *Scenario 0*

Restano escluse dalla caratterizzazione del modello le modalità di spostamento pedonale e con motociclo. Questo aspetto rafforza la verosimiglianza delle stime effettuate rispetto la reale situazione presente oggi sulle strade di Palermo registrando uno sbilanciamento del 76,92% e del 53,01% sull'utilizzo del mezzo privato rispettivamente su Palermo e sull'area che sarà soggetta a tariffazione.

Su questi dati si baseranno le considerazioni al termine di ogni scenario progettuale che, agendo sul piano tariffario della sosta, comporterà dei trasferimenti modali.

La procedura di soluzione del problema di progettazione è un' *euristica*, ovvero una metodologia di indagine scientifica che approccia un problema complesso con metodi semplificati. Nel caso in esame inoltre, per la natura intrinseca del *problema di punto fisso* (vedi par. 2.6), il metodo risolutivo non può che essere di tipo iterativo.

Ogni iterazione ha inizio dalla definizione di un piano tariffario. La variazione di un singolo *costo del parcheggio*, indicato CP in futuro, implica la variazione del costo di spostamento su auto privata, C_{TRAVEL} . Varia pertanto la ripartizione della domanda della matrice OD totale sui vari modi di trasporto. Il traffico veicolare privato, somma dei modi *car carpooling* e *carsharing*, potrà a questo punto essere assegnato al grafo.

Le varie iterazioni sono state effettuate facendo variare (aumentando o diminuendo) di 0,25 €, 0,50 € o 1 € la tariffa di ogni singola area di sosta, sia su strada sia nei parcheggi, in funzione del carico. Relativamente alla sosta su strada, ogni *zona di traffico* è stata trattata in modo indipendente, in modo da avere un risultato finale più preciso e in modo da effettuare un accorpamento più omogeneo, in un numero limitato di *zone tariffarie*, nella configurazione finale.

Ad ogni configurazione del piano tariffario della sosta, a cui corrispondono precisi split modali con trasferimento della domanda sui mezzi collettivi, seguirà una progettazione del potenziamento del trasporto pubblico locale, *TPL*, che vedrà:

- l'aggiunta di veicoli proprio su quelle coppie *od* che registrano un incremento di utenza superiore al valore soglia di 30 pass./h (il trattamento del termine T_{TRAVEL} , per la modalità bus, è già stato ampiamente analizzato nel sottoparagrafo 3.3.3);

- l'inserimento di apposite navette di collegamento, dette *shuttle bus*, dei parcheggi di interscambio con le destinazioni più attrattive.

Questo processo iterativo di progettazione è automatizzato sul foglio di calcolo *open source* di *Open Office*.

Riepilogando quindi, definito il piano tariffario nelle varie zone interne all'area di studio, si aggiornano le ripartizioni modali, frutto della variazione del costo di spostamento sull'auto (introduzione pedaggio aggiuntivo all'esistente). Si ripartisce con il modello di scelta modale la matrice OD totale nei vari modi di trasporto per ogni coppia *od* e si effettua l'assegnazione al grafo del solo traffico veicolare privato tramite il software AxE.

Per il processo di assegnazione si è utilizzato un algoritmo all'equilibrio deterministico *DUE*, che in AxE è stato siglato con *FW* ed è caratterizzato da due valori che indicano rispettivamente la precisione che si vuole raggiungere (0,1) e il numero di iterazioni massime (10). In questo caso, se l'algoritmo non raggiunge la precisione fissata si arresta comunque alla decima iterazione.

In questa applicazione si è scelto di utilizzare un'impostazione della matrice OD in lista *>ODL*, e cioè per ogni riga viene riportato il nodo origine, destinazione e il valore della domanda di mobilità.

Relativamente alle funzioni di costo, nel caso di funzione *BPR* viene riportato sia il tempo di percorrenza dell'arco a flusso nullo t_0 sia la capacità dell'arco stesso, invece, nel caso di funzione *PLN* viene riportato soltanto il tempo di percorrenza a flusso nullo t_0 o un valore di costo fisso che si vuole associare all'arco.

Così come indicato nel sottoparagrafo precedente 3.5.1, è quindi possibile effettuare l'assegnazione all'equilibrio deterministico ed individuare i flussi sugli archi della rete. Si riporta di seguito a titolo di esempio una schermata di output di AxE.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	AxE: Algoritmo FW (equilibrio deterministico)											
2	Adattamento da Sheffi, "Urban...", fig. 5.1, p. 114 e tab. 5.4 p. 120											
3	>ALGORITMO											
4	FW	0,100	10									
5												
6	>GRAFO											
7		1	1792 PLN	1000,000		0	211,591	1	18	31,154		
8		2	1793 PLN	1000,000		0	478,586	1	22	92,146		
9		3	1794 PLN	1000,000		0	977,809	1	64			
10		4	1795 PLN	1000,000		0	1221,244	1	90			
11		5	1796 PLN	1000,000		0	335,598	1	91			
12		6	1797 PLN	1000,000		0	386,227	1	92			
13		7	1798 PLN	1000,000		0	104,14	1	107	46,35		
14		8	1799 PLN	1000,000		0	146,336	1	144			
15		9	1800 PLN	1000,000		0	65,613	1	145			
16		10	1801 PLN	1000,000		0	1427,346	1	149			
17		11	1545 PLN	1000,000		0	322,584	1	150			
18		12	1546 PLN	1000,000		0	100,878	1	159			
19		13	1547 PLN	1000,000		0	114,23	1	165			
20		14	1548 PLN	1000,000		0	571,529	1	166			
21		15	1549 PLN	1000,000		0	798,853	1	172			
22		16	1550 PLN	1000,000		0	110,983	1	195			

Figura 3.7 – Schermata dell'output dati di AxE

AxE, inoltre, permette di salvare la matrice dei tempi e delle distanze dell'ultima iterazione e quindi per ogni coppia OD si ha la possibilità di conoscere, per il trasporto privato, il valore del tempo di viaggio T_{TRAVEL} e la distanza $dist$. Questi due parametri, variando le utilità di spostamento con l'auto privata V_{CAR} , $V_{CARPOOLING}$ e $V_{CARSHARING}$, aggiornano le ripartizioni modali e le funzioni di costo degli archi. Ci si ritrova pertanto nel *problema di punto fisso* già noto, per il quale il flusso di traffico influenza se stesso. Bisogna quindi ripercorrere il processo di assegnazione DUE sin quando lo *stop test*, di cui al par. 2.7.2, dà esito positivo, ovvero la variazione di flusso su ogni singolo arco del grafo, tra un'assegnazione e la successiva, è al di sotto di un valore soglia.

Importanti osservazioni vanno fatte anche sul termine $T_{PARKING}$ del modello. Il termine $T_{PARKING}$ esprime il tempo medio che l'utente del mezzo privato impiega per lasciare l'auto in sosta. Comprende quindi il tempo di ricerca del parcheggio, componente preponderante, ed un tempo fisiologico per l'effettuazione della sosta vera e propria. Nell'applicazione in esame il presupposto è che la tariffazione della sosta conduca alla situazione in cui, mediamente su macro zone, l'utente abbia la certezza di riuscire a trovare almeno uno stallone libero. Studi sulla letteratura scientifica spesso adoperano

percentuali minime del 15% (Vickrey, 1954) ritenendo che con tale valore viene eliminato il *traffico parassita*, ma per lo scopo di questo lavoro, questo parametro vuole essere strumentale, insieme alla tariffa, per limitare gli accessi in area urbana con mezzi privati da parte dei non residenti. Inoltre, per tener conto della zonizzazione, che non è scesa al dettaglio dell'isolato ma di zone di traffico più ampie, e del fatto che molte zone presentano un'offerta nulla di sosta per i non residenti si è deciso di garantire all'utente la presenza di almeno uno stallone libero nella macro zona di destinazione in modo da poter considerare nulla la congestione nella ricerca del parcheggio. In virtù dell'assunzione fatta, si considera nullo il tempo di ricerca del parcheggio, pertanto il termine $T_{PARKING}$, per i modi *Car*, equivarrà esclusivamente a quel tempo fisiologico per l'effettuazione della sosta, stimato nel valor medio di 10 min.

Vedremo più avanti come questa considerazione comporterà dei valori iniziali inammissibili della *funzione obiettivo*. L'ammissibilità della funzione infatti si raggiungerà nel momento in cui il piano tariffario avrà caratteristiche tali da soddisfare l'ipotesi iniziale per cui, mediamente su macro zone, è presente almeno uno stallone libero. Sino al raggiungimento di questa condizione, definita nel paragrafo successivo come *vincolo* della *funzione obiettivo*, ogni risultato risulta inammissibile perché non tiene conto della congestione, e quindi del perditempo, che il traffico veicolare privato incontra nella ricerca del parcheggio.

3.6 La funzione obiettivo

Il problema della progettazione viene espresso come un problema di ottimizzazione di una *funzione obiettivo* sottoposta a *vincoli*.

La funzione obiettivo sarà di tipo misto, ovvero una combinazione di obiettivi sociali e aziendali, in analogia all'analisi benefici-costi, alcuni dei quali devono essere minimizzati altri massimizzati. I vincoli saranno di

diversa natura. Oltre al vincolo di coerenza tra domanda e offerta, verrà posto il vincolo secondo il quale le tariffe di sosta siano positive e che all'interno dell'area d'intervento ci sia almeno uno stallone libero. Quest'ultimo vincolo ha un significato molto importante in quanto, la verifica dello stesso dà all'utente la certezza di riuscire a parcheggiare all'interno dell'area e, come già anticipato nel paragrafo precedente, elimina il problema della congestione stradale nella ricerca del parcheggio.

Fine ultimo della progettazione tariffaria sarà quindi quello di far cambiare le abitudini di mobilità degli utenti, facendogli abbandonare il mezzo privato a vantaggio di sistemi di trasporto collettivo, migliorando parallelamente l'efficienza del sistema complessivo.

Il *prezzo di efficienza*, o *prezzo ottimale*, può essere stimato attraverso la massimizzazione della funzione obiettivo:

$$f.o. = \text{Surplus}_{\text{utenti}} + \text{Incassi}_{\text{pricing}} + \text{Incassi}_{\text{bus}} - \text{Costi}_{\text{gestione}} + \text{Esterneità}$$

sotto i vincoli:

$$\underline{p} \geq 0$$

$$n^{\circ} \text{ Stalli liberi} > 0$$

$$\underline{f} = \underline{AP}(\underline{C}^{car}(\underline{p}, \underline{f})) \underline{d}^{car}(\underline{C}^{car}(\underline{p}, \underline{f}), \underline{C}^{bus})$$

dove:

- $S = \text{surplus dell'utente}$, espresso come prodotto tra la domanda totale d_{od} e la variazione di soddisfazione tra l'iterazione attuale e lo scenario progettuale di riferimento, diviso per il coefficiente β_{cost} che consente di esprimere il surplus in euro;
- $I = \text{incassi}$ relativi alla tariffa di parcheggio CP dell'area sottoposta a *pricing* e al biglietto dell'autobus, pagato dalla nuova domanda che per effetto del *pricing* si trasferisce dal mezzo privato al mezzo pubblico;

- $C = \text{costi di gestione}$ stimati pari a:

$$C_{\text{gestione}} = 4 \cdot N_{\text{bus}} \cdot 10$$

avendo stimato 4 € il costo per ogni km percorso da un autobus che viaggia con una velocità commerciale pari a 10 km/h;

- $E = \text{riduzione dell'esternalità}$ dovuta al trasferimento di un'aliquota di domanda dal modo auto al modo bus (Amoroso S. *et al.*, 2012; European Environment Agency, 2005; Migliore M. *et al.*, 2013) ed un'ulteriore aliquota dovuta alla variazione Δ del numero di utenti che optano per la modalità *carpooling*:

$$E = \sum_{od} [0,11 * OD_{\text{newpass_bus}} * km_{\text{bus}} + 0,07 * \Delta OD_{\text{newpass_carpooling}} * km_{\text{carpooling}}]$$

Quindi, la funzione obiettivo può essere scritta come:

$$\begin{aligned} f.o. = & \frac{1}{\beta_{\text{cost}}} \sum_{od} d_{od} [\ln(e^{V_{\text{CAR}}} + e^{V_{\text{CARPOOLING}}} + e^{V_{\text{CARSHARING}}} + e^{V_{\text{PT}}})_{\text{iterazione}_n} + \\ & - \ln(e^{V_{\text{CAR}}} + e^{V_{\text{CARPOOLING}}} + e^{V_{\text{CARSHARING}}} + e^{V_{\text{PUBLICTRANSPORT}}})_0] + \\ & + CP * OD_{\text{auto_park}} + \sum_{od} \text{biglietto}_{\text{bus}} * OD_{\text{newpass_bus}} - 4 * N_{\text{bus}} * 10 + \\ & + \sum_{od} [0,11 * OD_{\text{newpass_bus}} * km_{\text{bus}} + \\ & + 0,07 * \Delta OD_{\text{pass_carpooling}} * km_{\text{carpooling}}] \end{aligned}$$

I tre vincoli indicano rispettivamente che la tariffa dei parcheggi e degli autobus deve essere positiva e che il numero di stalli liberi per macrozona deve essere positivo; l'ultimo vincolo è quello di interazione fra domanda e offerta.

Come si può notare, la funzione obiettivo è di tipo mista, ovvero una combinazione di obiettivi sociali e aziendali, in analogia all'analisi benefici-costi, alcuni dei quali devono essere minimizzati altri massimizzati.

A questo punto si è giunti alla fine di un'iterazione e per capire se continuare o meno bisogna controllare in primo luogo la verifica dei vincoli e se questa è confermata si passa a valutare il valore della funzione obiettivo. Lo scopo è quello di avere una funzione obiettivo con valore massimo e la verifica simultanea dei vincoli. Per far questo, non si può stabilire a priori quante iterazioni sono necessarie affinché il sistema converga a una soluzione ottimale, ma è indubbio che la cura nello stabilire le variazioni tariffarie consente di convergere più velocemente alla soluzione.

3.7 L'euristica

La soluzione del problema di progettazione si raggiunge con l'ottimizzazione della funzione obiettivo. Questo processo segue sia precise regole matematiche sia procedimenti empirici basati su norme di buona progettazione. Per questi aspetti si parla di *euristica*.

L'*Euristica* è un approccio alla risoluzione di problemi che attiene a metodi che si affidano a determinate regole che consentono la risoluzione di un problema complesso tramite metodi semplificati.

Per il problema in esame, tutta la fase di determinazione delle matrici OD, di scelta modale e di assegnazione, può essere affrontata con un approccio algoritmico; invece, la determinazione della tariffa ottimale di parcheggio viene risolta attraverso un'*euristica*, che qui di seguito verrà illustrata.

Ripercorrendo tale processo *Euristico*, già analizzato nei paragrafi precedenti, si riporta un esemplificativo diagramma di flusso che esprime l'articolazione della procedura risolutiva e le iterazioni necessarie per la convergenza della soluzione.

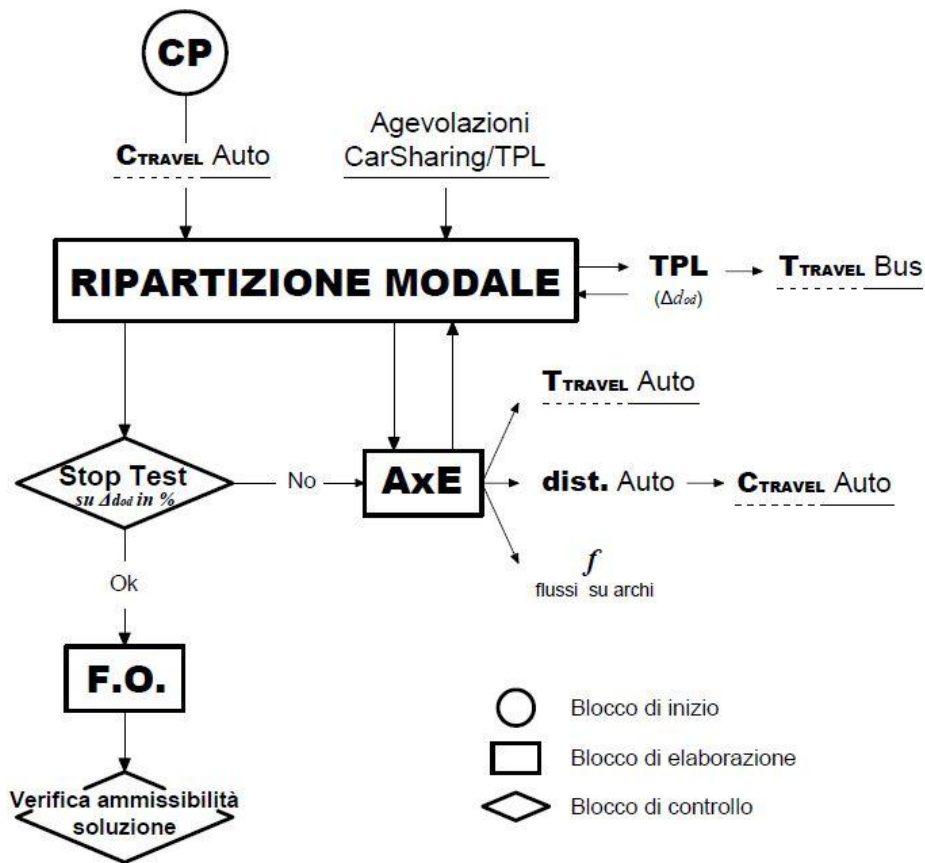


Figura 3.8 – Diagramma di flusso dell'euristica

Il processo ha inizio con la definizione del *Costo di Parcheggio (CP)* o più esattamente di un piano di tariffazione della sosta delle aree del centro urbano della città. Si applica un costo aggiuntivo a quello di base già in vigore di 1 €/h. Questa operazione comporta la variazione del termine C_{TRAVEL} dei modi *Car* e *CarPooling*. La tariffa non interessa il modo *CarSharing* usufruendo esso di stalli di sosta riservati ed avendo accesso alle strisce blu gratuitamente.

La variazione del termine C_{TRAVEL} per quelle coppie *od* che hanno destinazione interna all'area tassata, comporta la necessità di ricalcolare, rispetto allo *Scenario 0* di partenza, la ripartizione modale, sempre per singola coppia *od*.

Si avviano da questo momento 2 principali *cicli*:

1. il primo prevede l'assegnazione dei flussi veicolari privati, somma delle domande di spostamento sui modi *Car* per coppie *od*, tramite il software AxE; output del processo sono la matrice dei tempi di percorrenza su auto T_{TRAVEL} , la matrice delle distanze percorse *dist*, i flussi di traffico su ogni singolo arco del grafo. Variando le distanze percorse varieranno i termini C_{TRAVEL} dei modi auto (la distanza influisce sui costi carburante dello spostamento). È possibile inoltre, per lo più nelle iterazioni più avanzate, ipotizzare un finanziamento della modalità *CarSharing* che comporterebbe una variazione del termine C_{TRAVEL} per la medesima modalità. Con i nuovi termini T_{TRAVEL} e C_{TRAVEL} per il modo auto si ricalcolano le ripartizioni modali. È adesso possibile valutare l'entità della variazione di utenti che si trasferiscono sulla modalità bus per singola coppia *od* (Δd_{od}). In relazione al fatto che tale entità sia superiore al 30 pass./h, vedi par. 3.3.3, si stima il numero di veicoli in più da inserire in esercizio sulle tratte interessate. Varia pertanto il termine T_{TRAVEL} per il modo *bus*. È nuovamente d'obbligo ricalcolare gli split modali. Si conclude in tal modo il primo ciclo iterativo con lo *Stop Test*: se, per singola coppia *od*, si registra una variazione della domanda inferiore al 5% il test ha esito positivo e si passa alla fase successiva; diversamente occorre riefettuare le assegnazioni di traffico con AxE e ripercorrere la procedura già indicata.
2. Il secondo ciclo ha inizio da una condizione in cui sono noti gli split modali per tutte le coppie *od*, sono noti i flussi di spostamento sugli archi del grafo, è noto il potenziamento delle modalità di trasporto sostitutive del mezzo privato ed i relativi costi, è noto il piano tariffario della sosta, è verificato il vincolo di interazione domanda offerta. Si calcola quindi il valore della funzione obiettivo con le modalità indicate al par. 3.6. Si verifica il rispetto dei vincoli, in particolare occorre verificare che, per macrozona dell'area di studio, è presente almeno uno stallo libero così da poter considerare nulla la

congestione e verificare le assunzioni sul tempo di ricerca del parcheggio. Questa operazione è possibile analizzando i flussi di utenti che convergono nei parcheggi delle varie zone. Il bilancio deve essere positivo. Se il vincolo della f.o. è rispettato si è conclusa la verifica di ammissibilità della soluzione determinata per una data struttura tariffaria.

Il processo *Euristico* conduce pertanto ad una curva di valori della funzione obiettivo. Il valore massimo di tale curva costituirà la soluzione ottima alla quale corrisponde la struttura tariffaria *ottimale* per le aree di sosta determinate.

Nel paragrafo seguente si analizzeranno i risultati ottenuti dal processo di progettazione, specificando per singolo scenario progettuale le caratteristiche del piano tariffario e quindi il corrispondente valore ammissibile della funzione obiettivo.

3.8 I risultati dell'iter progettuale

Si è proceduto all'applicazione del metodo descritto, coniugando al processo di progettazione delle tariffe di sosta quello di incentivazione delle modalità di trasporto alternative all'auto privata, quali bus e car sharing.

3.8.1 La procedura *Euristica*

Sulla base dello *Scenario 0*, che riproduce con buona approssimazione la situazione attuale e già analizzata nel par. 3.5.2, si interviene sui costi di tariffazione oraria di sosta nelle zone ad alto flusso veicolare attratto nell'ora di punta del giorno feriale medio invernale. In particolare, oggetto di

attenzione saranno quelle zone nelle quali è molto alto il rapporto domanda/capacità di sosta, cioè il *coefficiente di occupazione* degli stalli.

Per abbreviare la trattazione di un problema, come già evidenziato, iterativo e laborioso, non si riporteranno tutte le ipotesi di scenari progettuali per le quali non sono rispettati i vincoli alla progettazione. Ci si limiterà a riportare uno stadio intermedio, lo *Scenario 1*, per il quale non si verifica la presenza di almeno uno stallo libero per macrozona quindi f.o. *non ammissibile*, e lo *Scenario 2* con il quale si raggiunge l'equilibrio rispettando i vincoli della funzione obiettivo.

Si riportano quindi nelle tabelle seguenti, per gli *Scenari 0 1 e 2*, i valori di capacità (stalli liberi al netto della sosta diurna dei residenti), domanda e tariffazione per ogni zona. In grigio sono evidenziate le aree di sosta interne all'area e con una tonalità più scura i parcheggi d'interscambio.

Scenario 0

<i>Zona</i>	<i>Capacità</i>	<i>Carico sul parcheggio</i>	<i>Criticità</i>	<i>Tariffazione [€]</i>
1	138	168	-30	1
2	0	323	-323	1
3	412	1182	-770	1
4	172	367	-195	1
5	87	288	-201	1
6	170	283	-113	1
7	343	1	342	1
8	415	235	181	1
9	565	308	257	1
10	249	519	-270	1
21	333	147	187	1
22	428	835	-407	1
23	397	292	106	1
24	328	56	272	1
38	247	187	61	1
39	486	489	-3	1
40	288	368	-79	1
41	233	60	173	1
55	285	276	9	1
56	233	201	32	1
57	337	120	217	1
77	0	199	-199	1
78	0	163	-163	1
79	0	216	-216	1
80	0	274	-274	1
81	326	75	251	1
108	0	54	-54	1
109	0	53	-53	1
110	0	194	-194	1
111	0	284	-284	1
112	0	340	-340	1
131	0	78	-78	1
132	18	749	-731	1
133	0	229	-229	1
Piazza Vitt. Em. Orl.	700	560	140	1
Piazzale Ungheria	173	45	128	1
Via Spinuzza	110	378	-268	1
Stazione Not.	138	127	11	1
Piazza Unita' d'Italia	44	9	35	1
Via Rutelli Ovest	60	139	-79	1
Piazzale Giotto	1655	0	1655	1
Via degli Emiri	690	0	690	1
Porto	150	0	150	1
Via E. Basile	928	0	928	1
Via Belgio	329	0	329	1

Tabella 3.7 – Parametri progettuali caratteristici dello *Scenario 0*

Scenario 1

<i>Zona</i>	<i>Capacità</i>	<i>Carico sul parcheggio</i>	<i>Criticità</i>	<i>Tariffazione [€]</i>
1	138	0	138	1
2	0	170	-170	3,5
3	412	491	-79	4,5
4	172	209	-37	2,5
5	87	110	-23	2,5
6	170	303	-133	1
7	343	0	343	1
8	415	271	144	1
9	565	183	382	1
10	249	288	-39	2,5
21	333	138	195	1
22	428	555	-127	3
23	397	392	5	1
24	328	65	263	1
38	247	186	61	1
39	486	471	16	1
40	288	478	-189	1
41	233	68	165	1
55	285	245	40	1
56	233	133	100	1
57	337	147	190	1
77	0	0	0	1,5
78	0	5	-5	1,5
79	0	82	-82	2,5
80	0	123	-123	3,5
81	326	51	274	1
108	0	0	0	1
109	0	18	-18	1
110	0	6	-6	1
111	0	159	-159	4
112	0	168	-168	4,5
131	0	0	0	1
132	18	300	-282	5
133	0	121	-121	3,5
Piazza Vitt. Em. Orl.	700	713	-13	1
Piazzale Ungheria	173	168	5	1
Via Spinuzza	110	548	-438	4,5
Stazione Not.	138	87	51	1
Piazza Unita' d'Italia	44	3	41	1
Via Rutelli Ovest	60	8	52	1
Piazzale Giotto	1655	575	1080	1
Via degli Emiri	690	142	548	1
Porto	150	44	106	1
Via E. Basile	928	401	527	1
Via Belgio	329	173	156	1

Tabella 3.8 – Parametri progettuali caratteristici dello *Scenario 1*

Scenario 2

<i>Zona</i>	<i>Capacità</i>	<i>Carico sul parcheggio</i>	<i>Criticità</i>	<i>Tariffazione [€]</i>
1	138	0	138	1
2	0	108	-108	6
3	412	424	-12	6
4	172	156	16	4
5	87	89	-2	4
6	170	303	-133	1
7	343	0	343	1
8	415	271	144	1
9	565	184	381	1
10	249	221	28	4
21	333	138	195	1
22	428	731	-302	1
23	397	392	5	1
24	328	65	263	1
38	247	186	61	1
39	486	471	15	1
40	288	478	-189	1
41	233	68	165	1
55	285	245	39	1
56	233	133	100	1
57	337	147	190	1
77	0	0	0	1,5
78	0	3	-3	4
79	0	45	-45	5,5
80	0	71	-71	6,5
81	326	51	274	1
108	0	0	0	1
109	0	10	-10	4
110	0	5	-5	3
111	0	99	-99	7
112	0	118	-118	6,5
131	0	0	0	1
132	18	209	-191	7
133	0	85	-85	5,5
Piazza Vitt. Em. Orl.	700	714	-14	1
Piazzale Ungheria	173	121	52	1
Via Spinuzza	110	548	-438	5
Stazione Not.	138	86	52	1
Piazza Unita' d'Italia	44	3	41	1
Via Rutelli Ovest	60	5	55	1
Piazzale Giotto	1655	471	1184	1
Via degli Emiri	690	126	564	1
Porto	150	61	89	1
Via E. Basile	928	349	579	1
Via Belgio	329	159	170	1

Tabella 3.9 – Parametri progettuali caratteristici dello *Scenario 2*

Emerge l'affezione dell'utente al mezzo privato e la necessità di spingere la tariffazione a valori elevati per riuscire a garantire la presenza di stalli liberi e quindi annullare la congestione. Caso estremo è il raggiungimento di un tariffa di 7 € in zone a forte richiesta di parcheggio ma con disponibilità di sosta pressoché nulla.

Con il metodo di rimodulazione dell'offerta del trasporto pubblico(vedi par. 3.3.3), al raggiungimento dell'equilibrio nello *Scenario 2* corrisponde un potenziamento di 47 bus sulle coppie *od* per le quali la crescita di domanda supera il valore di 30 pass./h. ed un servizio di *shuttle bus* sui parcheggi scambiatori con tempi di attesa massima di 10 min.

Nelle tabelle di seguito riportate si evince l'entità del trasferimento modale per le politiche attuate.

Split modali su Palermo [%]

<i>Scenario</i>	<i>Car</i>	<i>CarPooling</i>	<i>CarSharing</i>	<i>Bus</i>
<i>0</i>	<i>55,35</i>	<i>19,59</i>	<i>1,97</i>	<i>23,08</i>
<i>1</i>	<i>54,20</i>	<i>19,33</i>	<i>2,07</i>	<i>24,39</i>
<i>2</i>	<i>53,71</i>	<i>19,20</i>	<i>2,09</i>	<i>25,01</i>

Tabella 3.10 – Ripartizioni modali sull'area di Palermo

Split modali sull'area di studio [%]

<i>Scenario</i>	<i>Car</i>	<i>CarPooling</i>	<i>CarSharing</i>	<i>Bus</i>
<i>0</i>	<i>35,89</i>	<i>16,16</i>	<i>0,97</i>	<i>46,99</i>
<i>1</i>	<i>27,97</i>	<i>14,89</i>	<i>1,02</i>	<i>56,13</i>
<i>2</i>	<i>25,58</i>	<i>14,27</i>	<i>1,07</i>	<i>59,08</i>

Tabella 3.11 – Ripartizioni modali sull'area di studio

Attualmente sull'intera area della città di Palermo, il 74,95% di utenti utilizza il mezzo privato per gli spostamenti sistematici nell'ora di punta (somma delle modalità *Car* e *CarPooling* nello *Scenario 0*). L'applicazione del piano tariffario comporta l'abbassamento di tale percentuale al 72,91% nello

Scenario 2 per una differenza del 2,04%. Si traduce in 1833 auto in meno in circolazione.

Ovviamente si può dedurre che nella zona tariffata l'effetto della politica implementata è più marcato. Difatti l'applicazione del pedaggio di sosta riduce il numero di utenti che oggi utilizza il mezzo privato dal 52,04% al 39,65% per una variazione del 12,40% ovvero 2280 auto in meno nel centro storico.

Un altro dato importante da precisare è che nello *Scenario 2*, rispetto la situazione di partenza, 2940 utenti aventi destinazione interna all'area di studio utilizzeranno il bus anziché il mezzo privato.

3.8.2 Incentivazione delle modalità alternative

Raggiunto l'equilibrio con lo *Scenario 2* si vuole adesso valutare l'incidenza che hanno sulla f.o. altri interventi sull'orientamento della domanda. Se fin ora si è “*spinta*” la domanda di spostamento verso l'utilizzo dei mezzi pubblici con politiche di tariffazione, adesso la si vuole “*attirare*” sul *Carsharing* sul TPL rendendo queste modalità più appetibili.

Negli *Scenari 3* e *4*, non variando lo schema di pricing raggiunto, si ipotizza di incentivare il ricorso alla modalità *CarSharing*. Si è intervenuto riducendo del 10% nello *Scenario 3* e del 20% nello *Scenario 4* il costo che l'utente deve affrontare per spostarsi in *CarSharing*. Le somme scontate agli utenti saranno versate nelle casse dell'AMAT, società che gestisce il servizio di mobilità, facendo ricorso agli introiti della politica di pricing.

Quest'intervento, pur non variando i costi della sosta fissati nello scenario precedente, comporta nuovamente la soluzione del problema di punto fisso facendo ricorso ai modelli di scelta modale e di assegnazione.

Il risultato lo si può individuare nelle tabelle seguenti.

Split modali su Palermo [%]

<i>Scenario</i>	<i>Car</i>	<i>CarPooling</i>	<i>CarSharing</i>	<i>Bus</i>
<i>3</i>	<i>53,29</i>	<i>19,05</i>	<i>2,79</i>	<i>24,86</i>
<i>4</i>	<i>52,75</i>	<i>18,86</i>	<i>3,73</i>	<i>24,66</i>

Tabella 3.12 – Ripartizioni modali sull'area di Palermo*Split modali sull'area di studio [%]*

<i>Scenario</i>	<i>Car</i>	<i>CarPooling</i>	<i>CarSharing</i>	<i>Bus</i>
<i>3</i>	<i>25,42</i>	<i>14,17</i>	<i>1,57</i>	<i>58,83</i>
<i>4</i>	<i>25,20</i>	<i>14,04</i>	<i>2,30</i>	<i>58,47</i>

Tabella 3.13 – Ripartizioni modali sull'area di studio

Si nota come, rispetto allo *Scenario 2*, il trasporto con mezzo privato continua a ridurre la sua attrattività. Una notevole crescita invece si registra proprio nel numero di utenti che preferiscono il *CarSharing*, incoraggiati dagli incentivi posti in atto. Si registra un incremento dell'1,64% sull'intera Palermo e dell'1,23% sull'area centrale nello *Scenario 4* rispetto allo *Scenario 2*. Questi dati si traducono in 1916 e 299 di utenti in più sul *CarSharing* rispettivamente su Palermo e nel dettaglio sull'area tassata.

Altro dato interessante è che, così come previsto negli studi di calibrazione del modello di scelta modale (Catalano, Lo Casto, Migliore, 2008), la percentuale di utenti che, per singola coppia *od*, ricorre al servizio di *CarSharing* supera in taluni casi valori del 10%.

Negli ultimi due scenari progettuali, il *5* ed il *6*, si è proceduto in maniera analoga riducendo il costo monetario del biglietto del bus. Al 10% e 20% risparmiato dagli utenti negli scenari *5* e *6* corrisponderà un corrispettivo alla società che gestisce il TPL, a mezzo sempre degli introiti della tariffazione della sosta. Il risultato, in termini di trasferimenti modali, è il seguente.

Split modali su Palermo [%]

<i>Scenario</i>	<i>Car</i>	<i>CarPooling</i>	<i>CarSharing</i>	<i>Bus</i>
5	52,57	18,79	3,72	24,93
6	52,38	18,71	3,71	25,20

Tabella 3.14 – Ripartizioni modali sull'area di Palermo*Split modali sull'area di studio [%]*

<i>Scenario</i>	<i>Car</i>	<i>CarPooling</i>	<i>CarSharing</i>	<i>Bus</i>
5	24,98	13,91	2,28	58,82
6	24,77	13,79	2,26	59,18

Tabella 3.15 – Ripartizioni modali sull'area di studio

Ovviamente altre aliquote di utenti sono attirati sui mezzi pubblici riducendo il numero di auto in circolazione. Sarà oggetto del prossimo paragrafo valutare la validità progettuale di questa ultima soluzione.

Nel paragrafo seguente si analizzerà la risposta della funzione obiettivo per ogni scenario progettuale, sarà quindi possibile aggiungere ulteriori importanti considerazioni ed individuare la soluzione ottimale alla procedura di progettazione.

3.8.3 Ottimo di progettazione

Per ogni scenario progettuale proposto si è stimato il valore della funzione obiettivo così come specificato nel paragrafo 3.6. L'andamento di tale funzione e delle sue variabili ha permesso di meglio comprendere le conseguenze degli interventi proposti ed ovviamente di giungere all'individuazione della soluzione ottimale.

Prima di analizzare la funzione di cui sopra, si vuole porre l'attenzione sulla variabile *Surplus*, il cui andamento si è rivelato particolarmente interessante e meritevole di qualche considerazione. Il *Surplus dell'utente* è

espresso come prodotto tra la domanda totale d_{od} e la variazione di soddisfazione tra l'iterazione considerata e lo scenario progettuale di riferimento (*Scenario 0*), diviso per il coefficiente β_{cost} che consente di esprimerlo in euro. Tale variabile, in altre parole, a mezzo della funzione *logsum* misura la variazione di soddisfazione dell'utente tra due scenari consecutivi. Di seguito si riporta l'andamento del *Surplus* per ogni scenario.

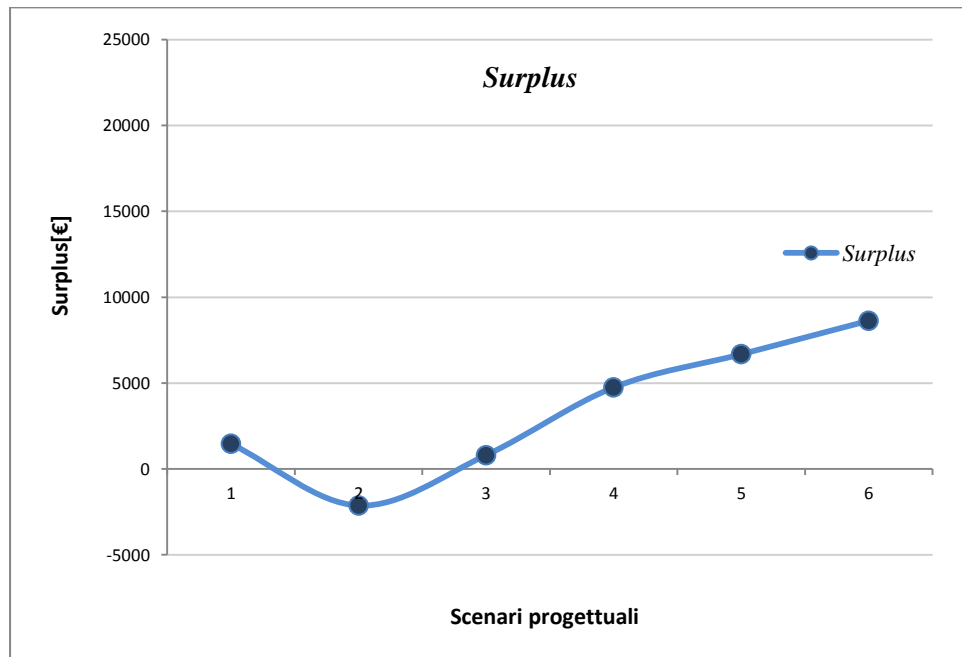


Figura 3.9 – Andamento *Surplus* nei vari scenari progettuali

Trascurando lo *Scenario 1*, di cui si è anticipata nel sottopar. 3.8.1 la non ammissibilità per mancato rispetto dei vincoli della f.o., si nota subito che alla configurazione dello *Scenario 2* corrisponde un valore negativo di *Surplus*. Questo aspetto esprime come, pur associando ad una politica di tariffazione, che elimina la congestione nella ricerca del parcheggio, un potenziamento del TPL adeguato alla nuova richiesta di spostamento, l'utente manifesta un grado di insoddisfazione, probabilmente da imputare all'alto livello di tassazione dello stallo raggiunto. Ulteriori simulazioni hanno dimostrato come la prosecuzione nell'incremento delle tariffe di

parcheggio, comporti la continua decrescita della funzione *Surplus*. La ragione di tale andamento risiede nel fatto che con il livello di *pricing* raggiunto nello *Scenario 2* si è già annullata la congestione garantendo all'utente la presenza di almeno uno stallone libero nelle sue zone di destinazione. Pertanto ogni ulteriore aggravio di tariffa si traduce esclusivamente in una tassa alla quale non corrispondono sostanziali miglioramenti. È quindi corretto l'andamento decrescente riscontrato nelle simulazioni.

Gli interventi sull'incentivazione monetaria del *CarSharing* e del *TPL*, diversamente, consentono la crescita della funzione verso valori positivi. Questi aspetti portano alla considerazione che il modello di scelta modale simuli una forte sensibilità dell'utente alla variabile "*costo di spostamento*" piuttosto che al "*tempo di spostamento*". Ipotesi confermata dall'indicatore *VOT* (*Value of Time*) ovvero il valore monetario del tempo stimato per il modello in utilizzo in 5,40 €/h (vedi tabella 3.5).

Si analizza adesso la risposta della *funzione obiettivo* alla procedura di progettazione implementata. L'andamento ed i valori numerici sono riportati di seguito.

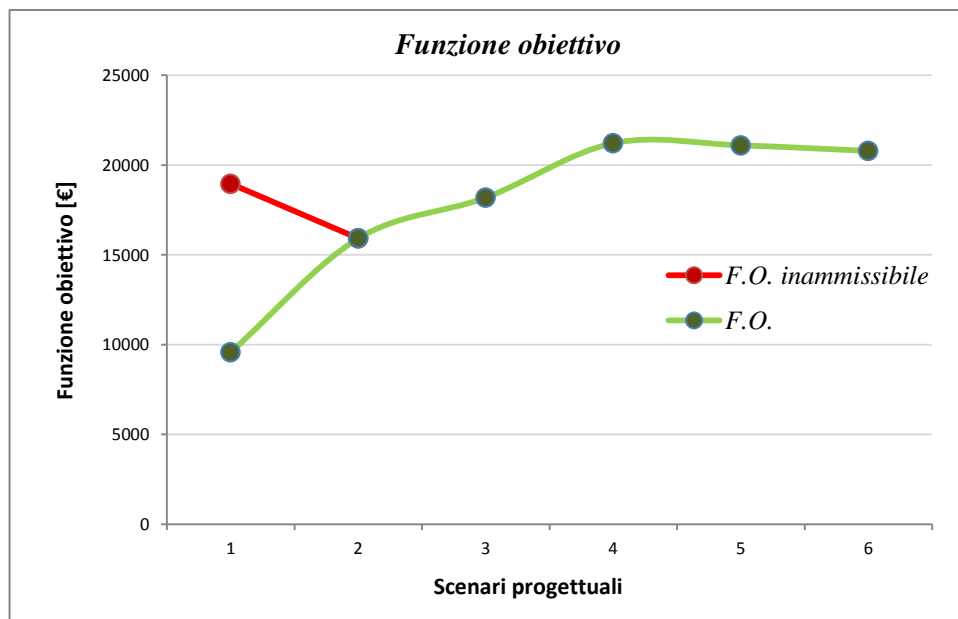


Figura 3.10 – Andamento della *funzione obiettivo* nei vari scenari progettuali

<i>Scenario</i>	<i>F.O. [€]</i>
1	9578,44
2	15914,49
3	18186,42
4	21215,90
5	21091,55
6	20788,14

Tabella 3.16 – Valori della *funzione obiettivo*

Lo *Scenario 1*, come già precisato più volte, non rispetta il vincolo della f.o. sul numero minimo di stalli liberi per macrozone, ovvero non elimina la congestione veicolare nella ricerca del parcheggio. Ciò comporta la non ammissibilità del valore della funzione. Nella figura 3.10 tale tratto di funzione è indicato con il colore rosso. Tuttavia si è ipotizzato di apportare una correzione alla f.o. sottraendole artificialmente il costo della congestione veicolare residua. Stimando un perditempo nella ricerca dello stalli libero mediamente in 15 min per utente, è possibile correggere la suddetta funzione del valore:

$$15 \text{ min} * VOT * \sum d_{od}^{Car}$$

ovvero il prodotto tra il tempo medio di ricerca del parcheggio, nell'ipotesi che sia presente la congestione, il valore monetario del tempo (5,40 €/h, vedi Catalano, Lo Casto, Migliore, 2008) e la somma delle auto confluenti nell'area soggetta a tassazione. Con questa correzione, frutto di verosimili ipotesi, la funzione obiettivo si attesta al valore di circa 9661 € per poi crescere nello *Scenario 2* nel quale si raggiunge l'equilibrio rispettando i vincoli di progettazione.

Con gli incentivi apportati a favore della modalità *CarSharing* negli scenari 3 e 4 si assiste ad un ulteriore crescita della funzione obiettivo che raggiunge il suo valore massimo proprio nello *Scenario 4*. Un inversione di tendenza invece si registra con la semplice incentivazione del TPL basata sulla riduzione del costo del biglietto, vedi gli scenari 5 e 6. In altre parole, se è vero che la riduzione del costo del biglietto del bus favorisce il

trasferimento modale sul mezzo pubblico, è anche vero che a questo *trasferimento modale* non corrisponde un reale miglioramento del sistema di mobilità nel complesso. Nel dettaglio si verifica che i costi di gestione di quest'intervento di orientamento della domanda non sono giustificati dal risultato ottenuto.

Si riportano di seguito, per completezza della trattazione, il riepilogo dell'andamento seguito dalle ripartizioni modali negli scenari progettuali.

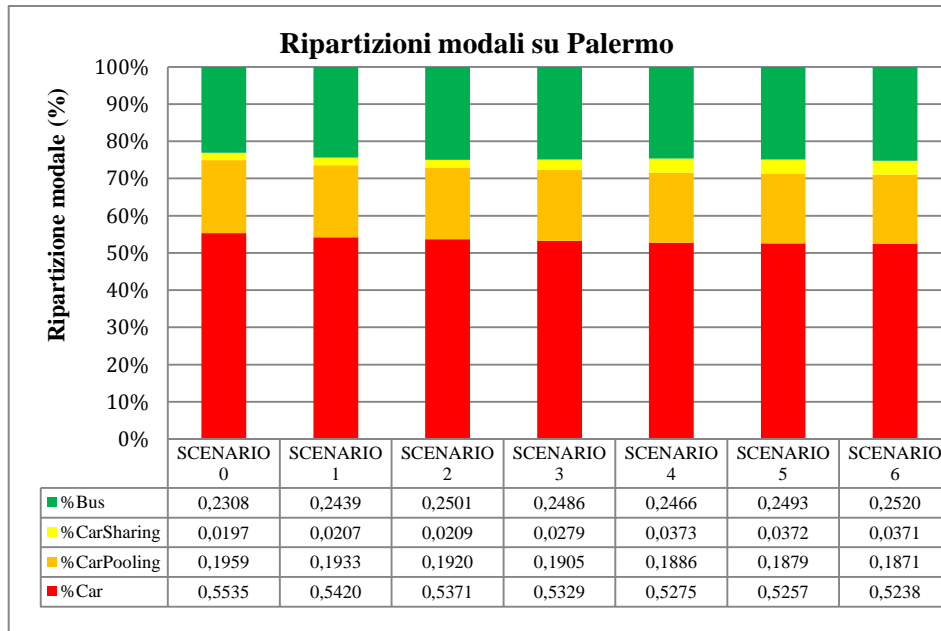


Figura 3.11 – Ripartizioni modali sulla città di Palermo nei vari scenari progettuali

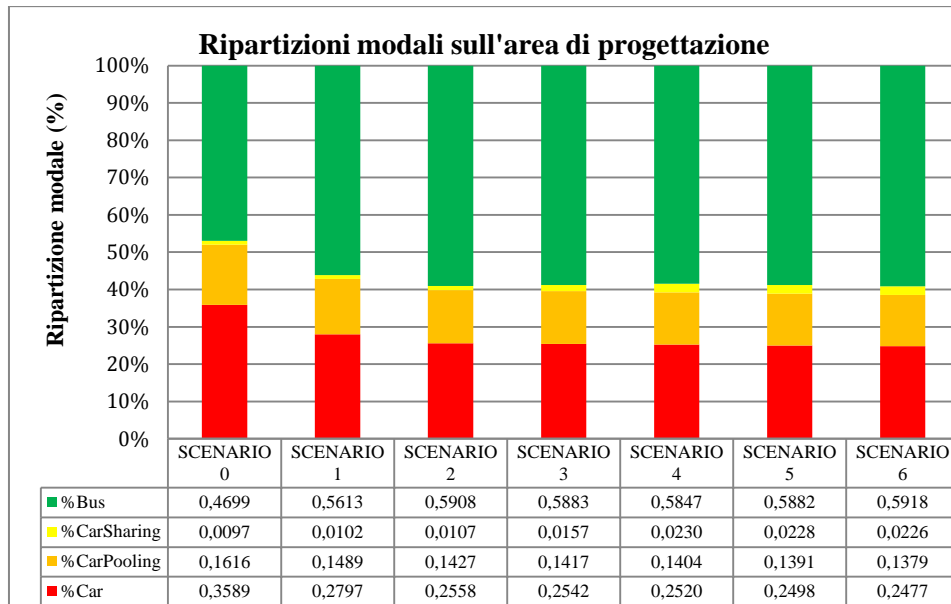


Figura 3.12 – Ripartizioni modali sull'area di progettazione nei vari scenari progettuali

Alla luce delle considerazioni apportate dallo studio della *funzione obiettivo* si può concludere affermando che la soluzione ottimale alla procedura di progettazione implementata è la configurazione progettuale individuata nello *Scenario 4* che associa alla rimodulazione del piano tariffario, tale da decongestionare il centro storico, l'incentivazione della modalità *CarSharing*.

3.9 Considerazioni finali

È possibile affermare che è stato concluso l'iter progettuale con la risoluzione dell'euristica adoperata, sono stati apportati semplici interventi di orientamento della domanda di mobilità e lo studio di una funzione progettuale, definita *ad hoc* per la problematica affrontata, ha condotto all'individuazione dell'ottimo di progettazione.

Con il metodo adottato si è dimostrato che in modo molto semplice e relativamente veloce si riesce a ottenere una proposta di rimodulazione dei

piani tariffari della sosta che rende il centro urbano non più soffocato dal traffico veicolare privato, ottenendo gli stessi effetti di uno schema di *road pricing*.

CONCLUSIONI

Lo studio di tesi condotto ha voluto approfondire il tema dell'orientamento della domanda di mobilità verso modalità di trasporto sostenibili. Si è analizzato come l'instaurazione di politiche di *pricing* può disciplinare il sistema dei trasporti riducendo la congestione, ma con il presupposto che non costituisca una mera tassazione dell'utente che, a fronte di una spesa, deve percepire un reale vantaggio delle proprie condizioni.

Si sono quindi condotti degli approfondimenti di noti casi internazionali, di città nel mondo che hanno già dovuto affrontare le medesime problematiche. Sono state studiate le tecniche implementate dalle amministrazioni e le risposte del sistema dei trasporti e dei cittadini. Quindi si è focalizzata l'attenzione sulla bibliografia scientifica di settore per lo studio del corretto approccio alla problematica e delle metodologie corrette da intraprendere.

L'iter progettuale nella ricerca della soluzione ottimale al problema della tariffazione della sosta ha condotto ad un procedimento risolutivo di tipo *euristico*.

La soluzione ottimale individuata comporta la definizione nel centro storico della città di Palermo di una zona a traffico limitato caratterizzata da una tariffazione dell'offerta di sosta variabile per zona di traffico in relazione alla domanda di parcheggio. L'arco temporale di riferimento è stato quello dell'ora di punta mattutina nel giorno feriale medio invernale. Questo aspetto dà ovviamente spunto alla possibile evoluzione del metodo che potrebbe e dovrebbe articolarsi nel gestire la tariffa ottimale durante l'intero arco della giornata.

Non meno importanti sono state, parallelamente all'evoluzione del processo di progettazione della tariffa, la messa in pratica di regole di buona progettazione quali la rimodulazione dei sensi di circolazione, l'individuazione di aree pedonali, l'attivazione di servizi navetta a servizio dei parcheggi di interscambio, l'incoraggiamento dell'utente all'utilizzo di modalità alternative e più sostenibili quali ovviamente il trasporto pubblico ma anche il *car pooling* ed il *car sharing*. Quest'ultima possibilità in particolare ha suscitato attenzione mostrando notevoli capacità di attrarre interessanti aliquote di domanda su singole direttrici di spostamento.

L'ottimo di progettazione individuato ha inoltre dimostrato capacità di autosostenersi economicamente grazie agli introiti della tariffazione a fronte dei contenuti costi di gestione e della semplicità del sistema tecnologico che lo caratterizza.

Di contro, il maggiore ostacolo sarà sempre l'accettabilità da parte dei cittadini, ragion per cui sarebbe fondamentale far precedere l'attuazione dello schema con un periodo di prova, accompagnato da campagne d'informazione e di sensibilizzazione.

Lo studio condotto vuole essere un approccio metodologico ad un sistema di gestione dei trasporti capace di orientare la domanda di spostamento verso modalità sostenibili con metodi alternativi, attenti al contenimento dei costi di gestione, alla reale utilità percepita dagli utenti ed ai problemi di vivibilità degli ambienti urbani.

RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo percorso di studi il pensiero va a chi mi ha sempre sostenuto, in tutti i momenti ed in tutti modi. Quindi inizio con la mia famiglia, Ignazio, Marianna e Serena che hanno sempre costituito un saldo punto di riferimento.

Un ringraziamento va a tutti gli amici e colleghi del gruppo trasporti del Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici con i quali ho condiviso studi ed esperienze. Un grazie particolare va ad Antonino Lo Burgio, amico e collega dalle ineguagliabili doti professionali ed umane.

Un ringraziamento particolare va al Prof. Marco Migliore che mi ha sostenuto in tutto il percorso accademico, dai primi studi universitari alla conclusione del dottorato di ricerca e che mi ha trasmesso la passione per una materia complessa come quella dei trasporti.

BIBLIOGRAFIA

- Amoroso S., Catalano M., Galatioto F., Migliore M. (2012), "The interaction between rail stations and urban area in medium-sized towns. A case study for Trapani", *Ingegneria Ferroviaria*, LXVII, 11, 923-941.
- Amoroso S., Migliore M., Catalano M., Galatioto F. (2010), "A demand-based methodology for planning the bus network of a small or medium town", *European Transport*, 44, 41-56.
- Arnott R. (2006), "Spatial competition between parking garages and downtown parking policy", *Transport Policy* 13, 458-469.
- Axhausen K.W., Polak J.W. (1991), "Choice of parking: Stated preference approach", *Transportation*, 18 (1) 59-81.
- Azari K. A., Arintono S., Hamid H., Davoodi S. R. (2013), "Evaluation of demand for different trip purposes under various congestion pricing scenarios", *Journal of Transport Geography*, 29, 43-51.
- Azari K. A., Arintono S., Hamid H., Rahamt R.A.O.K. (2013), "Modelling demand under parking and cordon pricing policy", *TransportPolicy*, 25, 1-9.
- Bateman, I. (2001), "The effect of road traffic on residential property values: a literature review and hedonic pricing study", *Edinburgh: Scottish Executive*.
- Beckmann M., McGuire C., Winsten C. (1956), "Studies in the Economics of Transportation", Yale University Press, New Haven, CT.
- Bellei G., Gentile G., Papola N. (2000), "Ottimizzazione del trasporto urbano in contesto multiutente e multimodo mediante l'introduzione di

- pedaggi", *Modelli e Metodi per l'Ingegneria del traffico* a cura di Cantarella G. E., Russo F, Ed. Franco Angeli, Milano, Italy, pp.347-370.
- Ben Akiva M. E., Lerman S. R. (1985), *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*, The MIT Press: Cambridge, Mass.
- Benenson I., Martens K. (2008), "From modeling parking search to establishing urban parking policy", *Zeitschrift Künstliche Intelligenz*, 3(08), 8-13.
- Bierlaire M. (2009), "Estimation of Discrete Choice Models with BIOGEME 1.8", *Transport and Mobility Laboratory*, EPFL - École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Bifulco C. (1993), "A Stochastic User Equilibrium Assignment Model for the Evaluation of Parking Policies", *Ejor*, 71, pp. 269-287, 1993.
- Bifulco C. (1995), "Un modello di equilibrio stocastico per l'assegnazione multiutente e multimodale alle reti di trasporto urbane", *Sviluppi della ricerca sui sistemi di trasporto* (a cura di) E. Cascetta e G. Salerno, Collana Trasporti, Ed. Franco Angeli, Milano, 1995.
- Bonsall P., I. Palmer (2004), "Modelling drivers' car parking behaviour using data from a travel choice simulator", *Transportation Research Part C* 12, 321-347.
- Cantarella G.E. (1997), "A general fixed-point approach to multimode multiuser equilibrium assignment with elastic demand", *Transportation Science* 31, pp. 107-128.
- Cantarella, G.E. (2001), "Introduzione alla tecnica dei trasporti e del traffico con elementi di economia dei trasporti", *UTET*.
- Cascetta E. (1998), "Teoria e metodi dell'ingegneria dei trasporti", *UTET*.

- Catalano M., Lo Casto B., Migliore M. (2008), "Car sharing demand estimation and urban transport demand modelling using stated preference techniques", *European Transport* 40, 33-50.
- Comune di Palermo (1997), *PUT – Piano Urbano del Traffico*.
- Comune di Palermo (2009), *PUT – Piano Urbano del Traffico*.
- D’Acerno L., Gallo M., Montella B. (2005), "Proprietà teoriche dei modelli di assegnazione multimodale nel caso di funzioni di costo non separabili", *Metodi e tecnologie dell’ingegneria dei trasporti – Seminario 2002* (a cura di) Cantarella G.E. e Russo F., Franco Angeli Editore, 2005, pp. 414-427.
- D’Acerno L., Gallo M., Montella B. (2006), "Optimisation models for the urban parking problem", *Transport Policy* 13, 34-48.
- D’Acerno L., Montella B., Gallo M. (2002), "Multimodal assignment to congested networks: fixed-point models and algorithms", *Proceedings of PTRC 2002 "European Transport Conference 2002"*, Cambridge (UK) 9-11 September 2002.
- Di Giovanna M. (2009), "Un sistema di supporto alle decisioni per la progettazione ottimale del cordon pricing nelle aree urbane. Il caso studio di Palermo", *Tesi di laurea in Ingegneria Civile*, Università degli Studi di Palermo.
- European Environment Agency (2005), *Indicator fact sheet - TERM 2005* 25:EEA, Copenhagen, Denmark.
- Gattuso D. (1992), "Un modello di assegnazione dinamica della domanda di sosta. Applicazione per la valutazione del programma urbano parcheggi della città di Reggio Calabria", *Modelli e metodi per l’analisi ed il controllo delle reti di trasporto* (a cura di) E. Cascetta e G. Salerno, Collana Trasporti, Ed. Franco Angeli, Milano, 1992.

- Gervasoni A., Sartori M. (2007), "Il road pricing: esperienze internazionali, costi, benefici e sostenibilità finanziaria", *Liuc Papers*.
- Flowerdew, A.D.J. (1993), "Urban traffic congestion in Europe: road pricing and public transport finance", *London: Economist Intelligence Unit*.
- Gervasoni A., Sartori M. (2007), "Il road pricing: esperienze internazionali, costi, benefici e sostenibilità finanziaria", *Liuc Papers*.
- Hess D.B. (2001), "Effect of free parking on commuter mode choice: Evidence from travel diary data", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1753.
- Hess S., Polak J.W. (2004), "An analysis of parking behaviour using discrete choice models calibrated on SP datasets", ERSA conference papers, European Regional Science Association.
- Jaensirusak, S. (1999), "Urban road pricing: from theory to practice", *Thailand: Department of Civil Engineering*, Udon Rathathani University.
- Kain J. (1994), "Impacts of congestion pricing on transit and carpool demand and supply", *In National Research Council, Transportation Research Board, Committee for Study on Urban Transportation Congestion Pricing Curbing gridlock: peak-period fees to relieve traffic congestion, vol. 2. National Academy Press, Washington, DC*.
- Kelly J. A., Clinch J. P. (2006), "Influence of varied parking tariffs on parking occupancy levels by trip purpose", *Transport Policy*, 13(6), 487–495.
- Lewis, N.C. (1994), "Road pricing: theory and practice", *London: Thomas Telford*.
- Lo Burgio A. (2013), "La progettazione di interventi per una mobilità sostenibile in ambito urbano", Tesi di Dottorato di Ricerca, Università degli Studi di Palermo.

- Lo Burgio A., La Franca L., Ferrante G. (2012), "Valutazione dell'accessibilità con software open source", *Le Strade*, n.8-9 Agosto-Settembre 2012, 68-71.
- Migliore M. (1998), "Un modello d'ottimizzazione domanda-offerta nella sosta", *Proc. 3rd Conf. Rilievi, modellizzazione e controllo del traffico veicolare*, Rende (Italy), 1998.
- Migliore M. (2002), "The perception of network congestion by using parking fees", *Urban Transport VIII*.
- Migliore M. (2005), "Dispensa di Laboratorio sperimentale dei Trasporti", Università degli Studi di Palermo.
- Migliore M., Catalano M., Castelluccio F., Lo Burgio A., Di Giovanna M. (2013), "The latent factors behind the urban travel behaviour", EWGT2013 – 16th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, Porto, Portugal, 4-6 September 2013.
- Migliore M., Catalano M., Lo Burgio A., Maritano L. (2012), "The analysis of urban travellers' latent preferences to explain their mode choice behaviour", *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 162, 193-203.
- Montella B., Gallo M., D'Acierno L. (2001), "Un modello di assegnazione multimodale su iper rete per la simulazione degli spostamenti di tipo Park and Ride", *Metodi e modelli per il trasporto pubblico locale* (a cura di) Podestà C. e Maja R., Franco Angeli Editore, 2001, pp. 175-197.
- Pucher, J. (1993), "Social and environmental cost of automobile driving", *Passenger Transport* 51, 1-5.
- Rodonò C. (2013), "Politiche di pricing per una mobilità sostenibile in ambito urbano. Il caso studio di Palermo", Tesi di laurea in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Palermo.

- Salerno G. (2007), Manuale dell'utente AxE (Assegnazione per Esperti).
- SFpark (2013), SFpark, webpage, <http://sfpark.org>.
- Sheffi Y. (1985), *Urban Transportation Networks*, Prentice-Hall, Englewood, 1985, pp. xvi-399.
- Shoup D. (2004), "Curb Parking: the ideal source of local public revenue", *Regional Science and Urban Economics*, 34, 6, 753-784.
- Shoup D. (2004), "The ideal source of local public revenue", *Regional Science and Urban Economics*, 34(6), 753-784.
- Shoup D. (2006), "Cruising for parking", *Transport Policy*, 13(6), 479-486.
- Shoup D. (2007), "Cruising for Parking", *Access*, No. 30, Spring 2007, pp.16-22.
- Verhoef, E., Nijkamp, P., Rietveld, P. (1995), "The economics of regulatory parking policies: the (im)possibilities of parking policies in traffic regulation", *Transportation Research A* 29, 141-156.
- Vickrey W. (1954), "The economizing of curb parking space", *Traffic Engineering*, November 1954, 62-67.
- Vickrey W. (1992), "Principles of Efficient Congestion Pricing", Columbia University.
- Vythoulkas, P. (1991), "Evaluating the effects of road pricing during the morning peak", Oxford: University of Oxford.
- Whittles, M. (2003), "Urban road pricing: public and political acceptability", *Basingstoke: Ashgate Pub Group*.
- Wigan, M.R. (1973), "The effects of the network structure on the benefits derivable from road pricing", *Crow Thorne: Library Services*.

Zambrini M. (2007), "Esperienze di road pricing e pedaggio urbano in Europa", *Istituto di Ricerche Ambiente Italia*.

SITI INTERNET CONSULTATI

Comune di Palermo
www.comune.palermo.it

AMAT Palermo S.p.A.
www.amat.pa.it

Comune di Milano
www.comune.milano.it

Istat, Istituto nazionale di statistica
www.istat.it

Land Transport Authority, Singapore
www.lta.gov.sg

Congestion Charging, , Regno Unito
www.cclondon.com

Transport for London, Regno Unito
www.tfl.gov.uk

Department for Transport, Regno Unito
www.dft.gov.uk

Norwegian Public Road Administration, Norvegia
www.vegvesen.no

Swedish Transport Administration, Svezia
www.trafikverket.se

Swedish Transport Agency, Svezia
www.transportstyrelsen.se

San Francisco Municipal Transportation Authority, Stati Uniti
www.sfpark.org

Wikipedia, enciclopedia libera e collaborativa
www.wikipedia.org